

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö loodusgeograafias

Glatsiofluviaalsete pinnavormide morfoloogia ja geoloogia

Palivere ja Pandivere servamoodustiste kompleksis

Maria Laidla

Juhendaja: PhD Tiit Hang

MSc Katrin Kalla

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: /allkiri, kuupäev/

Osakonna juhataja: /allkiri, kuupäev/

Tartu 2014

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
2. Liustiku liikumise dünaamika ja seda väljendavad pinnavormid.....	5
2.1. Liustikutekkeliste pinnavormide klassifikatsioon.....	6
2.1.1. Oosid.....	7
2.1.2. Möhnad.....	7
2.1.3. Sandurid.....	8
2.1.4. Glatsofluviaalsed deltid	8
3. Viimase Weichseli jäätumise dünaamika Skandinaavia liustiku kagusektoris	10
3.1. Pandivere servamoodustiste vöönd.....	12
3.2. Palivere servamoodustiste vöönd.....	12
4. Materjal ja meetodid.....	15
5. Tulemused ja arutelu	17
5.1. Pandivere servamoodustiste vöönd.....	17
5.1.1. Aegviidu	17
5.1.2. Kellavere.....	20
5.1.3. Tudulinna.....	23
5.1.4. Vahelaane	25
5.2. Palivere servamoodustiste vöönd.....	28
5.2.1. Jaakna	28
5.2.2. Keedika.....	30
5.2.3. Kuusalu.....	32
5.2.4. Soodla	34
6. Järeldused	37
7. Kokkuvõte	38
8. Summary	39
Tänuavaldused.....	40
Kasutatud kirjandus.....	41
Lisad 1-8.....	45

1. Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureusetöö raames uuriti Pandivere ja Palivere servamoodustiste vöönditesse jäävate glatsiofluviaalsete pinnavormide geoloogiat ja morfoloogiat ning nende sobivust optiliselt stimuleeritud luminescents meetodiga dateerimiseks.

Eesti nüüdisreljeefi on kujundanud mitmed jäätumised, neist viimase, Hilis-Weichseli jäätumise dünaamikat väljendavad pinnamoes nii oosid, voored aga ka servamoodustiste kompleksis paiknevad otsamoreenid ja glatsiofluviaalsed deltad, milledest viimased iseloomustavad liustiku taandumise protsesse. Eestis on liustiku taandumise dünaamikat uuritud alates 20. sajandi algusest, kuid selle veelgi paremaks mõistmiseks on vaja rohkem dateerinuid ning seda erinevate meetoditega. Üheks võimalikuks glatsiofluviaalsete setete ja pinnavormide dateerimiseks kasutatavaks meetodiks on optiliselt stimuleeritud luminescents meetod (OSL, *Optically Stimulated Luminescence*- ingl. k).

OSL meetod võimaldab määrata otsest vanust setetel, mida näiteks setete dateerimisel enim kasutatava ^{14}C meetodiga teha on võimatu, sest neis setetes puudub orgaanika (Wallinga 2002). Lisaks seab radiosüsiniku meetod ka üsna kitsad ajalised piirid. OSL meetodiga mõõdetakse kvartsi ja K-päevakivi mineraalides olevate elektronlõksude tühjenemisel („nullimisel“) emiteeritavat luminescentskiirgust. Kristallvõre elektronlõksud on valgustundlikud, mis päevavalgust saades mõnekümne sekundi pärast tühjenevad. Mõõtes kiirguse intensiivsust, on võimalik määrata, millal settes sisalduvad kvartsi ja K-päevakivi mineraali viimati päevavalguse käes viibisid. OSL dateeringuteks sobivad hästi peene- ja keskmiseteralised liivad, mida võib leida glatsiofluviaalsetest pinnavormidest (deltad, sandurid). OSL meetod on väga hea viis liustiku liikumise dünaamika ajaliseks iseloomustamiseks. Seega oleks enne pinnavormide ja setete dateerimist vaja teha detailne geoloogiline ja morfoloogiline analüüs selgitamaks, kas usaldusväärse dateeringu saamiseks on settimiskeskkond olnud sobiv ning millistest pinnavormidest tasuks proove võtta (Thrasher et al. 2009).

Bakalaureusetöö eesmärgiks on anda ülevaade viimase Skandinaavia liustiku taandumise protsessist ja selle ajalisest raamistikust Eestis. Lähemalt uuriti liustiku taandumisega seotud pinnavorme kaheksal uuringualal Põhja-Eestis, mis on osa Pandivere ja Palivere servamoodustiste vöönditest ning mille materjal võiks olla OSL dateeringuks sobiv. Töö peamiseks eesmärgideks on kirjeldada Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndis paiknevaid glatsiofluviaalseid pinnavorme ning neid moodustavaid setteid ja ühtlasi hinnata

nende sobivust OSL meetodil dateerimiseks. Lisaks sellele anda ka ülevaade ning hinnang varasematele vanusemäärangutele.

Pinnavormide geoloogiliseks kirjeldamiseks on töös kasutatud varasemate uuringute andmeid kaheksa karjääri kohtades, mis uuringualadel paiknevad. Digitaalne reljefianalüüs tugines LIDAR kõrgusandmetel.

2. Liustiku liikumise dünaamika ja seda väljendavad pinnavormid

Liustik on tahke jää mass, mis tekib pika aja jooksul lume kuhjumisel, tihenemisel ja ümberkristalliseerumisel. Püsiv jääkate saab tekkida olukorras, kus akumul eerub rohkem lund kui suudab ära sulada. Jää paksuse kasvades hakkab liustik liikuma perifeeria suunas. See toimub läbi sisemise deformatsiooni liustiku enda massi ja gravitatsiooni mõjul. Raskusjõu mõju tuleneb jääkeha paksusest ja sellest, et liustik on oma servaala poole kaldu, mille põhjustab akumulatsiooni ja ablasiooni erinev suhe tsentris ja liustiku äärealadel. Liustiku pind jaguneb kaheks: toitumis- ehk akumulatsioonialaks (*accumulation zone* – ingl. k) ning sulamis- ehk ablasioonialaks (*ablation zone*). Esimesel ületab akumulatsioon, nt lume kuhjumine selle ära sulamist ehk ablasiooni. Ablasioonialal kaotab aga liustik oma massi, kas sulamise või jääpankade eraldumisega rohkem, kui jõuab juurde sadada ehk ablasioon ületab akumulatsiooni. Mõlemat ala eraldab tasakaalujoon ehk lumepiir (*equilibrium line, snowline*), kus nii akumulatsioon kui ka ablasioon on võrdsed. Akumulatsiooni tõttu suureneb liustiku pinna kallakus kuni on piisav, et liustiku liikuma panna. Liustikujää voolab plastse kehana, viies akumulatsioonialal akumul eerunud massi ablasioonialale, vähendamaks pinna kallakust ning säilitamaks tasakaalu (Bennet & Glasser 2003; Benn & Evans 2010).

Liustikujää voolab sellele avalduva nihkepinge (*shear stress*) mõjul läbi kolme mehhanismi: sisemise deformatsiooni (*internal deformation*), basaalse libisemise (*basal sliding*) ja liustikualuse kihi deformatsiooni (*subglacial bed deformation*) kaudu. Liustiku peamise liikumismehhanismi määrab selle põhjakihi temperatuur. Selle alusel jaotatakse liustikud külmadeks ja soojadeks liustikeks. Külmade liustike (*cold-based, polar glaciers*) temperatuur on alla 0°C ning nende aluspind on külmunud. Need liustikud liiguvad aeglaselt läbi sisemise deformatsiooni. Soojad liustikud (*warm-based, temperate glaciers*) on sulamispunkti lähedase temperatuuriga ja aluspind on sula olekus. Soojad liustikud liiguvad lisaks sisemisele deformatsioonile ka basaalse libisemise kaudu, sest liustiku põhja ja aluspinna vahel on jää rõhulisel sulamisel tekkinud veekiht. Kui soe liustik liigub üle paremini deformeervate setete lisandub sisemisele deformatsioonile ning basaalsele libisemisele ka liustikualuse kihi deformatsiooni kiirus (Bennet & Glasser 2003).

Kui kliimatingimused on soodsad hakkab liustik kasvama, liikudes jäävoolude ja –keeltena üle maa, toimub liustiku pealetung (*advance*). Liustiku kasvu soodustavad ka sobiv, väheste takistusteta alusreljeef ning hüdroloogilised tingimused. Liustik taandub (*retreat*), kui selle

servaaladel ületab sulamine juurde tekkiva jää massi (Kalm et al. 2011a). Liustiku lokaalset liikumissuunda kajastavad jäävoolude liikumisega orienteeritud ehk radiaalsed pinnavormid ning need moodustuvad nii liustiku pealetungil kui ka taganemisel. Liustiku taandumine jäätumisalalt ei ole aga ühtlane protsess, vaid külmematel perioodidel liustikuserv kas püsib paigal (liustikuserva statsionaarne asend) või isegi liigub jäätumiskeskusest kaugemale (liustikuserva pealetung). Sellistel perioodidel kujunevad liustikuserva ette erinevast settematerjalist koosnevad liustiku servaga paralleelsed marginaalsed pinnavormid, mida nimetatakse ka servamoodustiteks.

2.1. Liustikutekkeliste pinnavormide klassifikatsioon

Liustiku tegevuse tulemusena tekkinud pinnavorme saab klassifitseerida erinevate tunnuste alusel. Peamiselt liigitatakse neid geneesi, settimiskeskkonna ning setete alusel.

Nii võib pinnavormid valdavate protsesside alusel liigitada kulutus, kuhje ning kulutuskuhjelisteks pinnavormideks. Settekeskkondadest eristatakse põhiliselt liustikualust (*subglacial*), liustikuserva esist (*ice-marginal*), liustikupealset (*supraglacial*), liustikuesist (*proglacial*) ja jääjärvelist või –merelist (*glaciolacustrine/glaciomarine*) keskkonda (Benn & Evans 2010). Selle klassifikatsiooni puhul tekib aga probleem pinnavormidega, mille tekkega on seotud enam kui üks keskkond. Bennetti ja Glasseri (2003) lihtsa klassifikatsiooni järgi jagunevad liustikulised pinnavormid nelja gruppi: liustiku jää vormitud pinnavormid liustiku ees (1) ja all (2) ning glatsiofluviaalsete protsesside käigus tekkinud pinnavormid liustiku ees (3) ja all (4).

Kuna käesoleva töö uurimisobjektideks on glatsiofluviaalseid pinnavormid ning setted, mis on seotud liustikuservaga, siis on otstarbekas keskenduda ainult glatsiofluviaalse tekkega pinnavormide klassifikatsioonidele.

Glatsiofluviaalsed pinnavormid tekivad liustiku sulamisvetega seotud protsesside käigus, kas liustiku peal, sees või all ning väljaspool liustiku piire. Glatsiofluviaalsetele setetele on iseloomulik terasuuruse muutuv koostis ja struktuur, varieerudes jämedateralisest kruusast ja liivast vooluvee sängides peenemateraliste liivadeni rahulikumast settekeskkonnast (Raukas & Kajak 1997a; Lowe & Walker 1997).

Liustiku sulamisvee teed läbivad nii liustiku aluseid, siseseid kui ka peal olevaid kanaleid ja lõhesid, enne kui väljuvad liustikuservast liustiku esisele alale (Carrivick & Russel 2007). Seetõttu on palju erinevaid settekeskkondi, kus glatsiofluviaalsed pinnavormid tekkida saaks.

Carrivick ja Russel (2007) jaotavad glatsiofluviaalsete protsesside tulemusena tekkinud pinnavorme nende tekke koha (liustiku ees või kontaktil tekkinud) ning mõõtmete (mikro-, meso- ja makroskaala) alusel. Nii liigitatakse sandurid ning selle peal tekkinud väikevormid liustikuesises settekeskkonnas moodustunud ning mõhnad ja oosid liustikukontaktil tekkinud pinnavormideks. Lowe ja Walkeri (1997) kohaselt lisandub sellele liigitusele ka jääjärveline settekeskkond. Raukas ja Kajak (1997a) jagavad aga glatsiofluviaalseid setted geneesi alusel liustikusisesteks (*englacial*) ja liustikuesisteks (*periglacial*). Selle alusel on fluviomõhnade ning radiaalsete ooside setteid liustikusisesed ning glatsiofluviaalsete deltade, sandurite ning marginaalsete ooside setteid liustikuesised.

2.1.1. Oosid

Oos ehk vallseljak (*esker*; *eiscir*- iiri k; *ås*- rts k) on pikk, kitsas, suhteliselt kõrge ning looklev vallilaadne positiivne pinnavorm, mis koosneb glatsiofluviaalsetest setetest. Ooside tekke olulisteks eeldusteks on vett mitteläbilaskev liustikualune pind ja püsiv tunnelite süsteem (Karukäpp 2005). Ooside orientatsioon sõltub liustiku kallakusest ja liustikualuse veesurve potentsiaalst ning seepärast võivad oosid tekkida ka vastumäge (Bennett & Glasser 2003). Vastavalt orientatsioonile liustiku liikumissuuna suhtes jagunevad oosid kaheks: radiaalseteks ja marginaalseteks. Radiaalsed oosid on reeglina sümmeetrilise ristiprofiiliga ning liustiku liikumise suunalised. Need tekivad liustikualustes ja –sisestes sulavee tunnelites ning lõhedes, märkides kunagisi sulavete vooluteid liustiku serva suunas (Benn & Evans 2010). Raukas (1977) jaotab Eesti marginaalsed oosid morfoloogia, geneesi ja sisemine struktuuri järgi kolmeks: sümmeetrilise ja kumera ristiprofiiliga oosid, platoo-sarnase profiiliga horisontaalkihilistest ja peeneteralistest setetest koosnevad oosid ning asümmeetrilise profiiliga erilist tüüpi (oosile sarnase kujuga) glatsiofluviaalsed deltad. Esimesed kaks gruppi oose moodustuvad marginaalsetes lõhedes kas liustikuserval või surnud jääs. Viimane tekib aga kahe kitsa delta ühinemisel liustiku ees. Oose võib esineda üksikult või oosistikena. Tihti seostatakse oose ka mõhnade, sõllide ja sulamisveetekkliste lavadega (Benn & Evans 2010; Karukäpp 2005).

2.1.2. Mõhnad

Mõhn (*kame*) on järskude nõlvadega kungas, mis koosneb peamiselt liivast ja kruusast. Kungasmõhn on tavaliselt ümara põhijoonega, 5–25 m suhtelise kõrguse ning 5°–25° nõlvakaldega. Geneesi ja setete alusel eristatakse Eestis fluvioglatsiaalseid ehk fluviomõhnu,

limnoglatsiaalseid ehk limnomõhnu ning segamõhnu. Valdavalt koosnevad liustikujääst ümbritsetud järvedes kujunenud limnomõhnad horisontaalkihilistest aleuriitidest, nende nõlvad on järsemad ning laed tasasemad. Fluviomõhnad on aga jämedateralistest setetest ning on tõenäoliselt kujunenud vooluveelistes tingimustes irdjääpangaste ning lõhederohke jääserva vahelistes avalõhedes (Raukas & Rõuk 1995). Mõhnad tekivad glatsiofluviaalsel settimisel liustiku peal või servas (Benn & Evans 2010). Mõhnad võivad esineda nii üksikult kui ka mõhnastikuna. Mõhnastike iseloomustab küngaste ja seljakute vaheldumine sõllide ehk sulglohkudega, mis on tekkinud setetesse jäänud surnud jää sulamisel. Mõhnastikud, eriti lineaarsed mõhnastikud, näitavad liustiku kunagiste sulavete vooluteede paiknemist (Bennett & Glasser 2003).

2.1.3. Sandurid

Sandur (*outwash plain*; *sandur*- isl k) on ulatuslik, distaalses suunas kaldu oleva ebatase pinnaga jääsulamisvee jõgede kokkukantud setetest moodustunud tasandik (Benn & Evans 2010; Raukas & Rõuk 1995). Allvoolu vähenev gradient ning suurenev tasandiku laius viib vooluenergia järsu vähenemiseni, mistõttu on võimalik sanduri profiilis jälgida sette terasuuruse ning settimise viisi muutust. Üldjuhul vähenevad nii terasuurus kui ka terasuuruse muutlikkus allavoolu ning materjali ümardatus suureneb (Carrivick & Russell 2007). Sandurid tekivad muutliku väljavooluga veerežiimi tulemusena setete rikkas keskkonnas. Selle kontrollivateks teguriteks võivad olla nii normaalsed abrasiooni kontrollitud vooluveed, rohkete sademete põhjustatud üleujutused aga ka liustikus tallel olnud sulavee või vulkaanilise tegevuse käigus vabanenud tulvaveed (*jökulhlaup*- isl k) (Carrivick & Russell 2007). Sanduri proksimaalne osa võib asuda kas liustiku kunagisel servaalal, perioodilise väljavooluga jääjärve suudmes või teatud kaugusel kunagisest liustiku servavööndist, kus voolukiirus on aeglustunud, nt kohas, kus kitsas org avaneb laiemale tasandikule tihti otsamoreenide distaalsel küljel (Benn & Evans 2010). Sandur osundab taganevale liustikuservale, millel on suhteliselt suur sulavee ja setete väljavool (Bennett & Glasser 2003).

2.1.4. Glatsiofluviaalsed deltad

Glatsiofluviaalseks deltaks (*glaciofluvial delta*) nimetatakse settetasandikku, mis on tekkinud liustikult seisuveekogusse (merre või järve) voolava jõe suudmesse. Nende ulatus ja kuju ning setete paksus sõltuvad peamiselt aluspõhja reljeefist. Sealjuures väheneb setete terasuurus ja settimiskiirus kasvava kaugusega ning delta läheb distaalses osas enamasti üle

glatsiofluviaalseks sandurtasandikuks või mõnel juhul ka jääjärvetasandikuks (Raukas 1992). Delta iseloomulik profiil, kus proksimaalne osa on järsema nõlvakaldega ning distaalne osa delta jalamil on laugem, tekib delta levimisel veekogu suunas. Sellest tuleneb ka delta ehitus – kaldkihilist jämedamat materjali katab rõhtsa või põimkihilise tekstuuriga peeneteraline sete. Glatsiofluviaalsed deltid jagunevad liustikutoitelisteks ning liustiku kontaktil tekkinud deltadeks. Esimesel juhul saab delta oma setted liustikuesistest sulavee jõgedest, mida on transporditud üle delta ja liustiku vahelise maa-ala. Liustiku kontakti korral kasvab delta liustiku servast, ning selle proksimaalsele osale on iseloomulikud mattunud jää sulades tekkinud lohud ja sõllid. (Benn & Evans 2010).

3. Viimase Weichseli jäätumise dünaamika Skandinaavia liustiku kagusektoris

Kvaternaari ajastul katsid Ida-Euroopa lauskmaad korduvalt ulatuslikud mandriliustikud, mis ulatusid polaaraladelt põhjas, Doni ja Dnepri jõgedeni lõunas (Raukas & Kajak 1997b). Kvaternaari mandrijäätumised, täpsemalt Pleistotseeni jäätumised, jagunevad kolmeks: Vara-, Kesk- ja Hilis-Pleistotseeni jäätumisteks, kus eristatakse nelja peamist jääaega (Eburoni, Elsteri, Saale, Weichseli) ning kolme jäävaheaega (Waale, Holsteini, Eem) (Tabel 1).

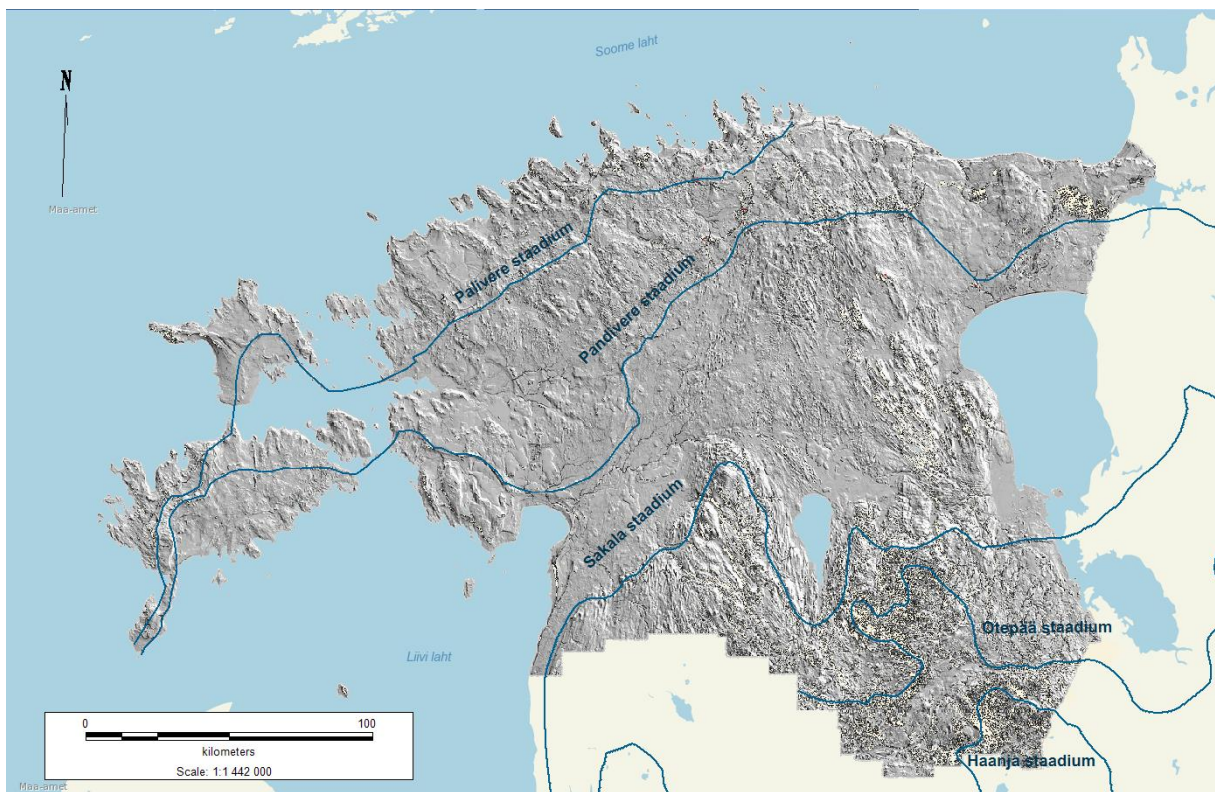
Tabel 1. Jääaegade ja jäävaheaegade rahvusvaheline terminoloogia (Kalm 2006 järgi).

Põhja-Euroopa ja Skandinaavia			Eesti	
Weichsel	Hilis-Weichsel	Denekamp Hengelo	Järva	Võrtsjärve
	Kesk-Weichsel	Moershoofd Oerel		Savala
	Vara-Weichsel	Odderade		Valgjärve
		Brorup		Kelnase
Eem	Warthe		Prangli	
Saale	Drenthe		Ugandi	Hilis-Ugandi Kesk-Ugandi Vara-Ugandi
Holstein			Karuküla	
Elster			Sangaste	

Eesti alal ei ole Vara-Pleistotseeni ning vanemate Kvaternaari jäätumiste moreenid säilinud suuresti tänu järgnevate jäätumiste tugevale erosioonile. Kesk-Pleistotseeni kahe jääaja, Elsteri (Sangaste) ja Saale (Ugandi) ning Holsteini (Karuküla) jäävaheaja setteid on leitud Lõuna-Eesti mattunud orgudest ning Ülem-Ugandi setteid ka Põhja-Eestist. Hilis-Pleistotseenist leidub Eestis Eemi (Prangli) jäävaheaja merelisi ja kontinentaalseid ning Weichseli (Järva) jääaja setteid. Alam-Weichselis oli Eesti ala jäävaba ning selle setteid iseloomustavad külmale kliimale kohased aleuriitsed savid ja liivad, milles leidub liustikuserva lähistel kasvanud taimede õietolmu. Varases Kesk-Weichseli staadiumis toimus arvatav jäätumine kahe jäävaba perioodi vahel 115 000–68 000 aastat tagasi (a.t) ja 44 000–27 000 a.t, mida kinnitavad arvukad OSL vanusemäärangud jõe- ja järvesetetest (Kalm et al. 2011b). Käesoleva töö seiskohalt on oluline aga viimane, Hilis-Weichselis alanud jäätumine.

Viimase jäätumise täpset algust Skandinaavia liustiku kagusektoris pole otseselt dateeritud, küll aga võib Ida-Soomest ning Lääne-Lätist pärit andmete põhjal oletada, et Hilis-Weichseli jäätumine algas ilmselt 26–22 tuhat cal (*calibrated years*, dateering on viidud vastavusse kalendriaastatega) aastat BP (*Before Present*, „tänapäevaks“ loetakse aastat 1950) (Kalm & Gorlach 2013). Jäätumise tsenter asus Skandinaavias ning mandriliustik liikus loodest üle Eesti, saavutades oma maksimumi Loode-Valgevenes mitte varem kui 22 600 cal aastat ¹⁴C aastat BP ning Kirde-Valgevenes, mitte varem kui 19 100 cal ¹⁴C aastat BP (Lasberg & Kalm 2013).

Tänapäevases pinnamoes väljendavad taganeva liustiku servaasendeid otsmoreenide ja glatsiofluviaalsete pinnavormide katkendlikud ahelad. Viimase jäätumise maksimumi ning Läänemere vahelisel alal on eristatavad kaheksa kuni üheksa servamoodustiste vööndit (Kalm & Gorlach 2013).



Joonis 1. Viimase liustiku taandumise dünaamikat iseloomustavate servamoodustiste vööndite paiknemine Eestis (Kalm 2012). Taustaks on Maa-ameti reljeefivarjutus WMS teenuse kaudu.

Eestis eristatakse viit peamist servamoodustiste vööndit: Haanja, Otepää, Sakala, Pandivere ja Palivere (Joonis 1). Need on enamasti välja kujunenud seisva liustiku servaaladel, kuid mõnes piirkonnas ka pealetungiva liustiku mõjul. Haanja otsamoreenide vöönd on vanim Eestis ning selle vanuseks on 14 700 aastat (Kalm et al. 2011b). Otepää servaalalt taandus liustik nii radiosüsiniku kui ka OSL dateeringute järgi rohkem kui 14 000 a.t (Kalm et al. 2011b). Kuigi

Sakala servavööndit peetakse kindlalt üheks liustikukeele asendiks Otepää ja Pandivere staadiumide vahel, on seda morfoloogiliselt raske tuvastada ning täpsed vanusemäärangud puuduvad. Sakala vööndi otsamoreenid, oosid ja mõhnastikud jäävad Sakala kõrgustiku ja Saadjärve voorestiku vahelisele alale. Liustiku ulatuslik taandumine Pandivere vööndis algas u 13 300–13 320 varviaastat tagasi ning taandumine Palivere servamoodustiste joonelt u 12 700 a.t (Kalm et al. 2011b). Kogu viimase jäätumise maksimum levikupiiri ning Läänemere vaheline ala oli jäävaba hiljemalt 13 300 cal ^{14}C aastat BP (Lasberg & Kalm 2013).

3.1. Pandivere servamoodustiste vöönd

Pandivere servamoodustiste vöönd on oma nime saanud Pandivere kõrgustiku järgi, mis jäi Pandivere staadiumil liustikuserva ette. Pandivere servamoodustiste vöönd kulgeb Peipsi järve põhjaosast ümber Pandivere kõrgustiku, läbi Kesk-Eesti Pärnu suunas. Läbi Pärnumaa kulgeb vöönd läänesuunas üle Suure väina ning Saaremaa Sõrve poolsaareni (Joonis 1). Pandivere staadiumi üheks silmapaistvaks servamoodustiseks on Lääne-Saaremaa otsamoreen, mis on 45 km pikk, 5–6 km lai ning kuni 35 m kõrgune. Peipsi järvest põhja jäävad aga Iisaku-Illuka servamoodustiste kompleks ooside ja mõhnastikega ning Sinimägede surveelised otsamoreenid. Peipsi nõgu ning Pärnu jõe basseini katsid ulatuslikud jääjärvad, kus settisid viirsavid (Kajak 1999).

Pandivere vööndi vanusemäärangud põhinevad eelkõige varvokronoloogial ning järvesetetest leitud orgaanika dateeringutel. Hang (2003) leiab, et Peipsi järve liustiku alt vabanemine algas 13 500 varvi aastat tagasi ning jääjärveliste varvide moodustumine lõppes 13 100 varvi aastat tagasi, korreleerudes hästi Neva vööndiga Loode-Venemaal, mille vanuseks peetakse 13 300 cal aastat BP. 13 300 cal aastat BP märgib ka Balti jääpaisjärve kõrgseisu (Rosentau et al. 2009). AMS ^{14}C dateeringud Haljala paleojärvest ja Udriku Suurjärvest näitavad, et settimine neis järvedes algas hiljemalt 13 800 cal aastat BP, tähendades seda, et Pandivere kõrgustik vabanes liustikust 500 aastat varem kui seni arvatud (Saarse et al. 2012). OSL dateeringud Valgejõe glatsiofluviaalsest deltast on Pandivere vööndi vanuseks andnud $12\,400 \pm 1200$, $12\,200 \pm 1200$ ja $59\,000 \pm 5000$ OSL aastat (Raukas 2009). Ainuke ^{10}Be dateering üksikult rahnult pakub Pandivere vööndi vanuseks 13 100 ^{10}Be aastat (Kalm et al. 2011b).

3.2. Palivere servamoodustiste vöönd

Palivere servamoodustiste vööndi, mis on oma nime saanud samanimelise oosi järgi, moodustavad: otsamoreenid Lääne-Saaremaa kõrgustikul ja Sõrves ning Hiiumaa ja Haapsalu

vahelisel alal, marginaalsed oosid Loode-Eestis ning glatsiofluviaalsed deltad Tallinna ja Kunda vahel ning Hiiumaal (Joonis 1). Palivere vööndi ida osa sukeldub Soome lahte, kuid olemasolevate andmete põhjal ei ole võimalik teha usaldusväärseid rekonstruktsioone vööndi võimaliku edasise kulgemise kohta Läänemere all (Raukas 1992; Karukäpp & Raukas 1997).

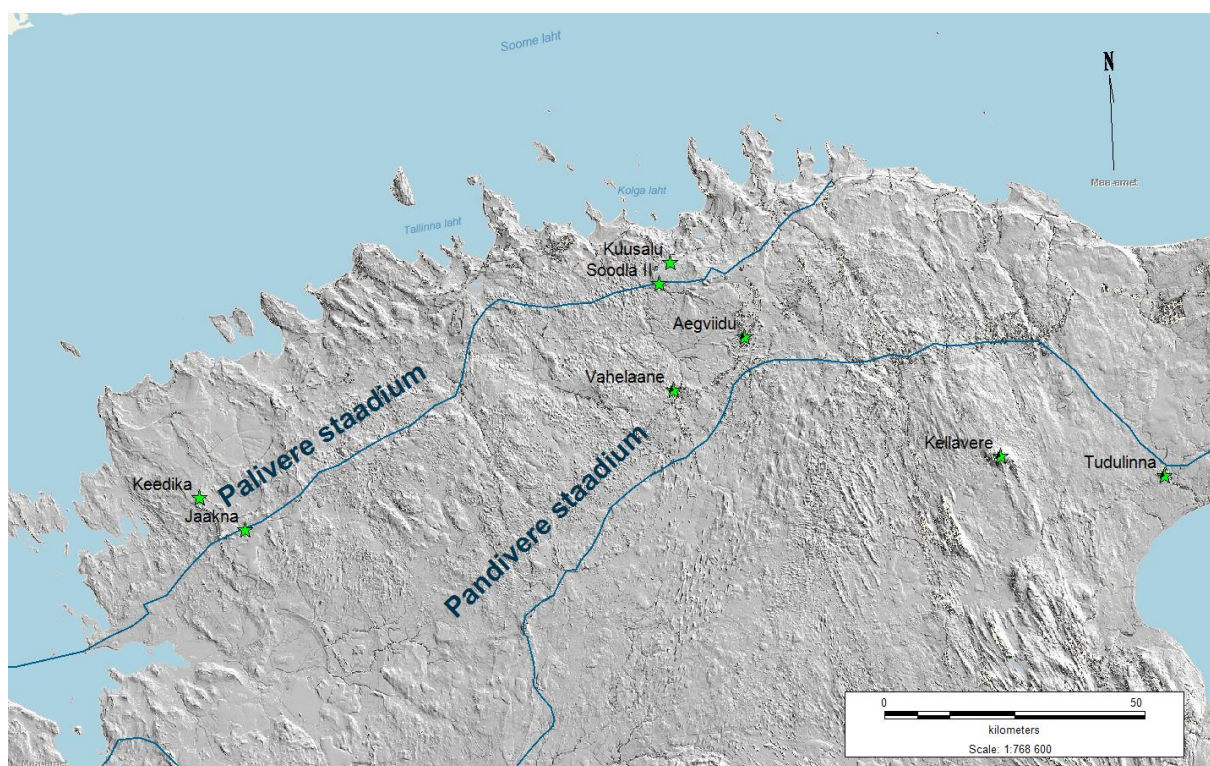
Erinevalt vanematest liustiku servamoodustiste vöönditest (Haanja, Otepää, Sakala) on Palivere servamoodustised tekkinud liustiku pealetungil. Seda tõestavad nii jääjärve setteid katvad glatsiofluviaalsed setted kui ka laialt levinud survelised otsamoreenid (Raukas 1992). Kalm (2011b) lisab, et liustiku serva pealetung selle maksimaalse asendini pidi vähemalt olema 35 km, mis on vahemaa Kõpu poolsaarelt leitud jäävaheaja setete ja servamoodustiste vööndi vahel. Palivere liustikukeele pealetung on ühtede autorite poolt korreleeritud Vimmerby pealetungiga (11 200 a.t) ning teisalt Levene moreeniga (12 000 a.t) Rootsis (Saarse et al. 2012). Kuna Kesk-Rootsi servamoodustised ja Salpausselkä otsamoreenid Lõuna-Soomes on Palivere vööndist eraldatud suhteliselt sügava Läänemerega, siis on raske luua otsest korrelatsiooni antud pinnavormide vahel. Pole ka täpselt teada, mis Palivere staadiumi aegse jõulise liustikukeele liikumise põhjustas, kas lühike kliima külmenemine Allerødi teises pooles või kiire soojenemine, ning kui kaugelt liustiku serv esialgselt taandunud oli. Kindel on aga see, et liustiku taandumiskiirused on Balti aladel erinevad olnud – idas aeglasemad kui läänes (Raukas 1992).

Palivere servamoodustiste vanuste määramine on “keeruline probleem” (Raukas 1992). Raukas (1977) kasutas viimase jäätumise liustiku taganemisdünaamika piiritlemiseks õietolmuanalüüsi, varvokronoloogiat ning ^{14}C dateerimise andmeid nii Eestist kui ka naaberaladelt ning määras Palivere staadiumi vanuseks 11 200 a.t. Õietolmu koostise analüüs moreeni katvast settekihist viitab sellele, et Palivere vöönd sai jäävabaks hiljemalt Allerødi alguseks (Raukas 1992). Radiosüsiniku meetodil dateerimine on selles servamoodustiste vööndis riskantne, kuna on oht, et vanemad Eemi jäävaheaja setted, intrusiivsed elemendid nagu juured ning looduslikult kare vesi võivad tuua kas noorema või vanema ^{14}C vanuse. Palivere vööndist lõunas asuvast Pandivere moreeni katvatest järve setetest on saadud mõned radiosüsiniku dateeringud, Kundast $11\,690 \pm 150$ a.t, Loobu orust $14\,725 \pm 260$ ja $13\,970 \pm 115$ a.t, millest viimase kahe suuremat vanust seletatakse kareda vee mõjuga orgaanikale (Raukas 1992; Raukas et al. 2004). Lisaks süsinikule on kasutatud ka berülliumi radioaktiivset isotoopi ^{10}Be , mille kaheksa proovi andsid Palivere servamoodustiste vööndi keskmiseks vanuseks 13 600 a.t, mis ületab ka Haanja vööndi ^{10}Be vanuse (13 100 a.t) ja on seetõttu kaheldavad (Kalm et al. 2011b). OSL dateeringud Palivere, Männiku, Sillaotsa ning Soodla deltadest on andnud

Palivere vööndi vanuseks 9800 ± 1300 kuni $94\,000 \pm 6000$ OSL aastat, neist kõige realistlikum vanusemäärang, $11\,300 \pm 1300$ OSL aastat, saadi Sillaotsa deltast (Raukas 2009). Vigalast, Pandivere ja Palivere servaasendite vaheliselt alalt on kõige paksemas viirsaviläbilõikes esinevate varvide arvu järgi tuletatud Palivere vööndi vanuseks 12 675 a.t ning sealt Palivere pealetungi vanuseks u 12 700 a. t (Kalm et al. 2011b).

4. Materjal ja meetodid

Käesolev uuring on osa koostööprojektist Stockholmi Ülikooliga, mille eesmärgiks on pinnavormide moodustumise aja otsene määramine. Täpsemalt käsitletakse neid pinnavorme, millest on juba eelnevalt, 2013. aasta augustis välitööde käigus kogutud proovid optilise luminesentsi (*Optically Stimulated Luminescence*, OSL) meetodil setete vanuse määramiseks. Detailselt kirjeldatavaid pinnavorme on kaheksa: Keedika, Jaakna, Kuusalu, Soodla, Aegviidu (Lõuniku), Kellavere, Vahelaane ja Tudulinna. Uuritavad pinnavormid jäävad Palivere ja Pandivere servamoodustiste vöönditesse Põhja-Eestis (Joonis 2).



Joonis 2. Uuringualade (rohelistes tähed) ja Palivere ning Pandivere servamoodustiste vööndite paiknemine Põhja-Eestis. Taustaks on Maa-ameti reljeefivarjutus WMS teenuse kaudu.

Pinnavormide morfoloogiliseks analüüsiks kasutati *Light Detection And Ranging* (LIDAR) seadmega mõõdetud maapinna reljeefi kõrgusandmeid, mis on saadud Maa-ametist. LIDAR on lennukile paigaldatud laserskaneerimise seade. Selle tööpõhimõte on arvutada maapinnalt tagasipeegeldunud impulsi koordinaadid, mille tulemusena moodustub punktipilv, mis koosneb nii taimestikult, hoonetelt kui ka maapinnalt peegeldunud valgusimpulsi andmetest. Laserskaneerimiseks on kasutatud aerolaserskannerit Leica ALS50-II. Lennud sooritati

2500m kõrgusel ning andmete kõrguslik täpsus on 0,07-0,12 m. Andmed antud alade kohta pärinevad aastast 2012 ja 2013 (Maa-amet 2014).

Uuritavate pinnavormide geoloogilised andmed saadi Eesti Geoloogiakeskuse fondist ja senised vanusedateeringud kirjandusest.

Kolme karjääri, Jaakna, Kellavere, Lõuniku, puuraukude koordinaatide leidmiseks tuli vastavate karjääride plaanid digida. Selleks skaneeriti esmalt plaanid ning koolutati need Eesti põhikaardi süsteemi (L-EST), kasutades *Microstation V8i* tarkvara *Raster Manager* tööriista. Koolutamiseks kasutati ankurpunkte projektsiooniga ja projektsioonita kihil, mis omavahel ühitati. Projektsiooniga kihiks loeti Maa-ameti avaliku WMS-teenuse kaudu kätte saadav värviline põhikaart. Kinnispunktideks valiti punktid, mis leiduvad mõlemal kihil ning on selgelt äratuntavad. Kõigil kihtidel osutusid seetõttu valituks maanteede ja/või kõrvalteede keskpunktid, mis uuritavaid karjääre läbivad või piiravad. Koolutatud plaanidelt digiti vajalikud puuraugud ning leiti nende koordinaadid.

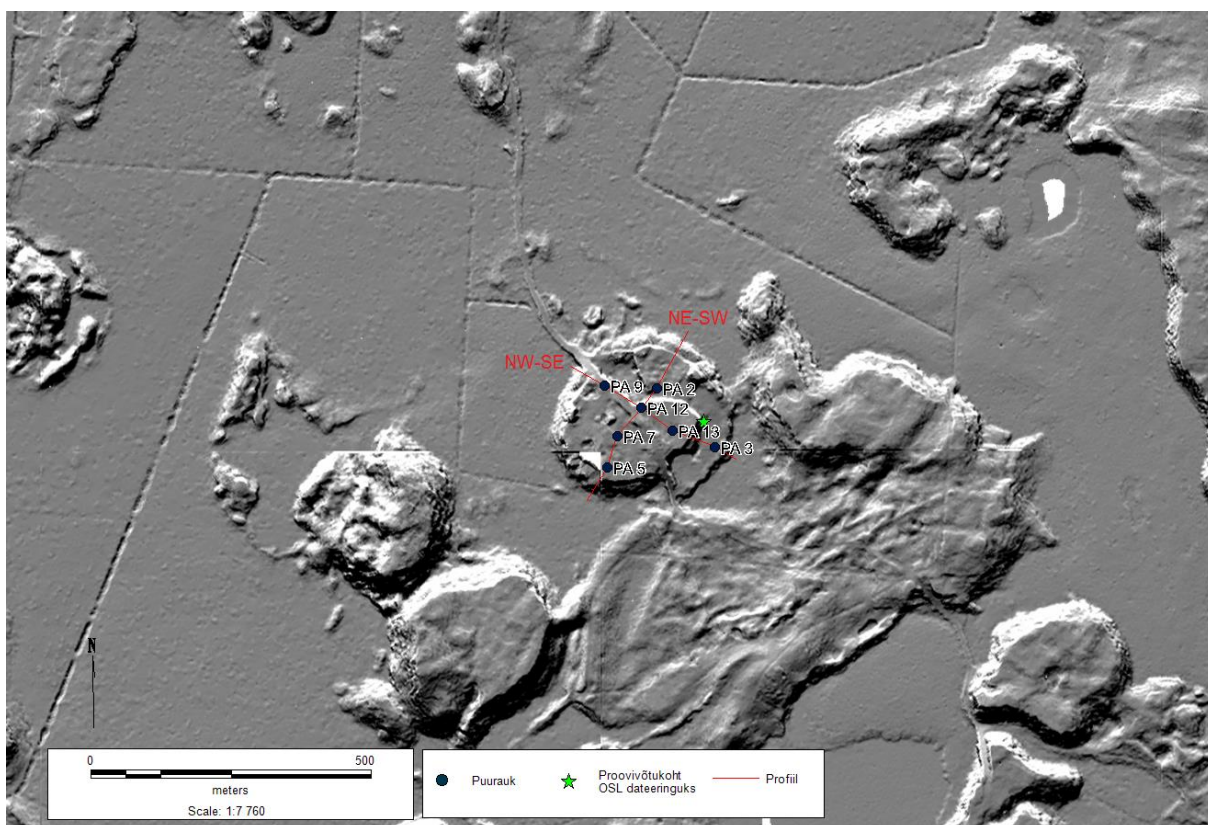
Puuraukude koordinaadid, mis saadi Eesti Geoloogiafondi aruannetest valitud uuringualade kohta, kanti tarkvarasse *MapInfo Professional 10.5*. Järgnevalt valiti puuraugud ning profiilid, mis võimalikult hästi kirjeldaks uuritavaid pinnavorme. Valitud puuraukude läbilõigete ning risti ja piki profiilide joonistamiseks kasutati *CorelDRAW* tarkvara. LIDARi kõrgusandmete töötlemiseks kasutati *MapInfo* liidest *Vertical Mapper*. Kaartide tegemisel kasutati samuti *MapInfot* ning Maa-ameti WMS teenust.

5. Tulemused ja arutelu

5.1. Pandivere servamoodustiste vöönd

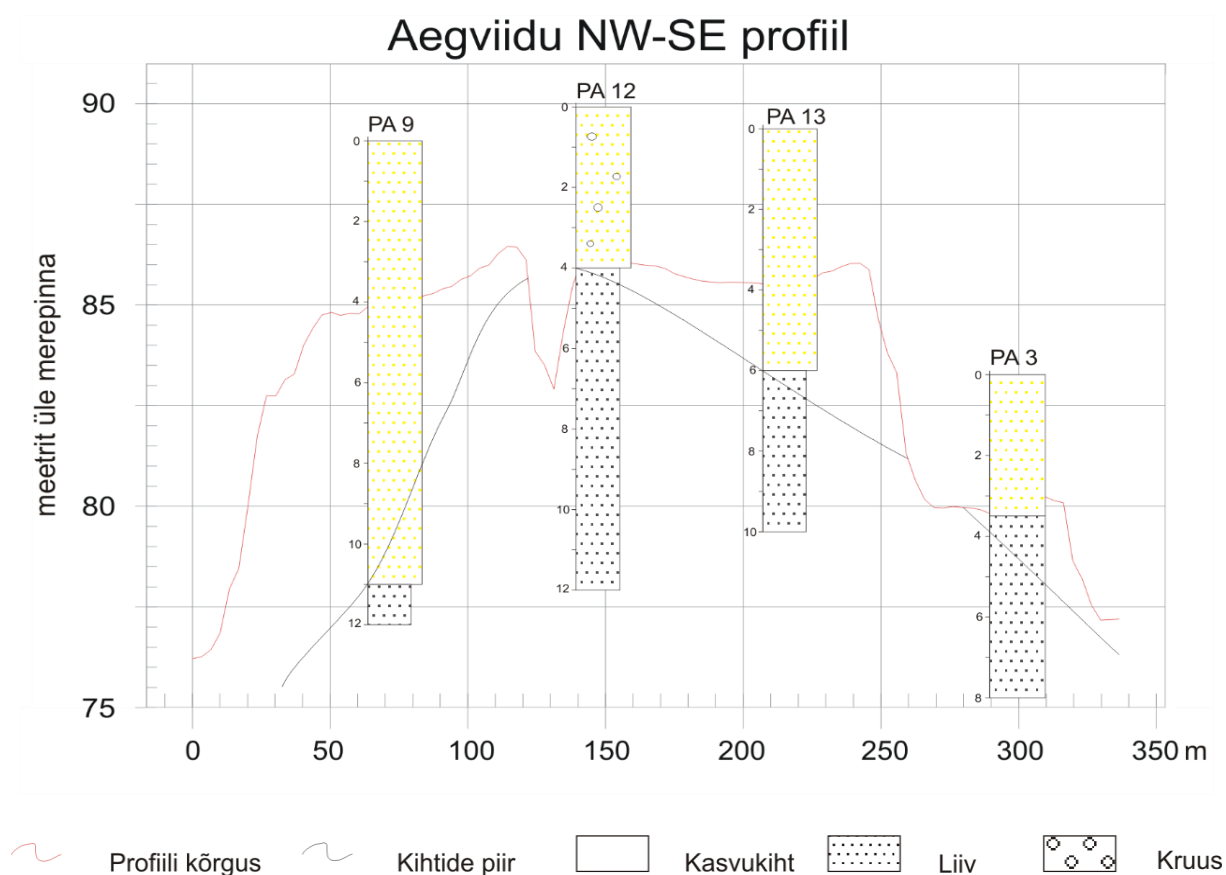
5.1.1. Aegviidu

Aegviidu uuringuala moodustab Lõuniku karjäär, mis asub Anija vallas, Harjumaal (Joonis 2). Lõuniku karjäär ning samanimeline mägi asuvad Aegviidust u 4 km kirdes. Lõuniku mägi on kaotanud oma loodusliku ilme, seda läbib tee ja sellesse on rajatud nüüdseks ammendatud liivakarjäär. Ümbritsev maastik Piibe maantee ja Soodla jõe vahelisel alal on väga liigestatud – väikesed sood ja järved vahelduvad liustiku sulamisvee setetest küngaste ja piklike vallseljakutega. Karjäär piirneb põhjast Lille sooga, kagus asub Änni järv ning edelas Määramägi. Piki Lille soo idakülge kuni Pukimäe ja Juudisaareni kulgeb Pikanõmme oos. Uuringuala jääb Põhja-Kõrvemaa lookuskaitsealale. Lõuniku karjäär asub Kõrvemaa tasandiku maastikurajoonis, Pandivere kõrgustiku ja Harju lavamaa vahel (Arold 2005).



Joonis 3. Lõuniku karjäär Aegviidu uuringualal ja seda iseloomustavate profiilide asukohad. Profiili NW-SE läbilõige Joonis 4 ja NE-SW läbilõige Joonis 5. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljefimudel.

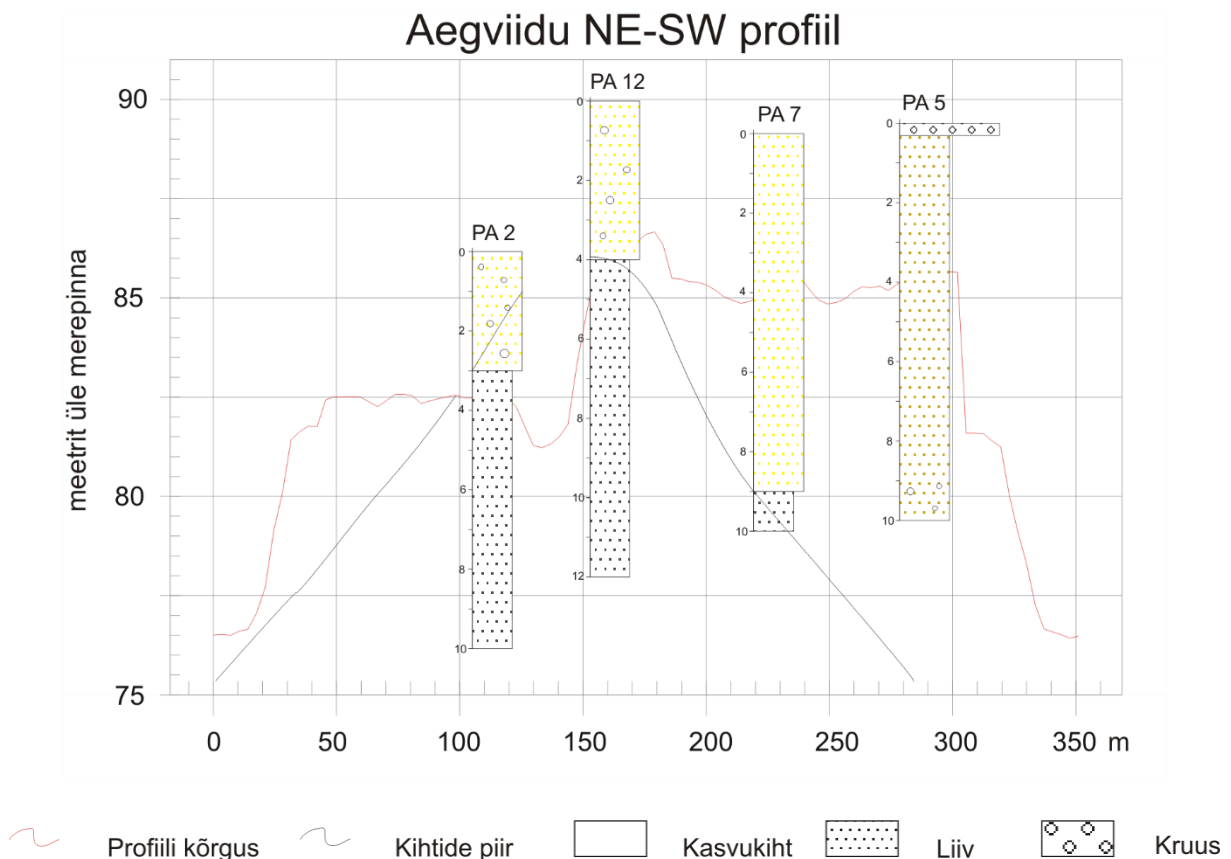
Uuritava pinnavormi lagi jääb vahemikku 80-86,5 m üle merepinna (ü. m. p.) ja on suhtelise kõrgusega kuni 10 m. Kasutatud uuringuaruande andmete (Toom 1992) ja LIDAR kaardistamise ajaline vahe on u 20 aastat ning seetõttu on karjääri pind tänapäeval kuni 4 meetrit madalam kui see oli puuraukude tegemise hetkel. Pinnavorm on kergelt ovaalse põhiplaaniga ning selle suurim ida-läänesuunaline diameeter on 340 m. Mäe looduslik nõlv on järsem lääne ja loode suunas, kus see jääb vahemikku 2-43°. Liivakarjääri tõttu on Lõuniku mäe põhja- ja idapoolne osa astmeline ja nõlvad on kohati järsud. Suurim kaldenurgaga nõlv on 52° ning see on orienteeritud kirde suunas.



Joonis 4. Loode-kagusuunaline ristprofiil (Aegviidu NW-SE profiil) koos puuraukude asukohtade ja läbilõigetega Lõuniku karjääris (Toom 1992). Profiili asukoht Joonis 3 ja läbilõigete kirjeldused Lisa 1.

Lõuniku karjääri kirjeldavad kaks profiili, loode-kagusuunaline ja kirde-edelasuunaline (Joonis 4 ja Joonis 5). Profiilid on konstrueeritud 7 puurauku andmeil, neist PA 12 on ühene mõlemale profiilile (Joonis 3). Pinnavormi tuumiku moodustab tihe ja halli värvi aleuriitliiv. Selle peal lasub kollane peeneteraline liiv. Lõunasuunal muutub mõlemas profiilis liiva lõimis või värvus. PA 3-s ei ole all pool lasuv liiv enam aleuriitne ning PA 5-s muutub peeneteraline liiv tihedaks ning värvuselt pruunikas-kollaseks. Pinnavormi kirde osas sisaldab peeneteraline liiv ka

üksikuid kruusateri. Kruusa leidub ka PA 5-s alates 9 meetri sügavuselt. Aleuriitliivast koosnev tuumik jälgib enam-vähem pinnavormi kuju, kaevandamise tõttu ulatub tuumiku kõrgem osa maapinnale. Tuumikut katva peeneteralise liiva kihi paksus on suurem läänenõlval ning väikseim künka lael, varieerudes 3-11 m.

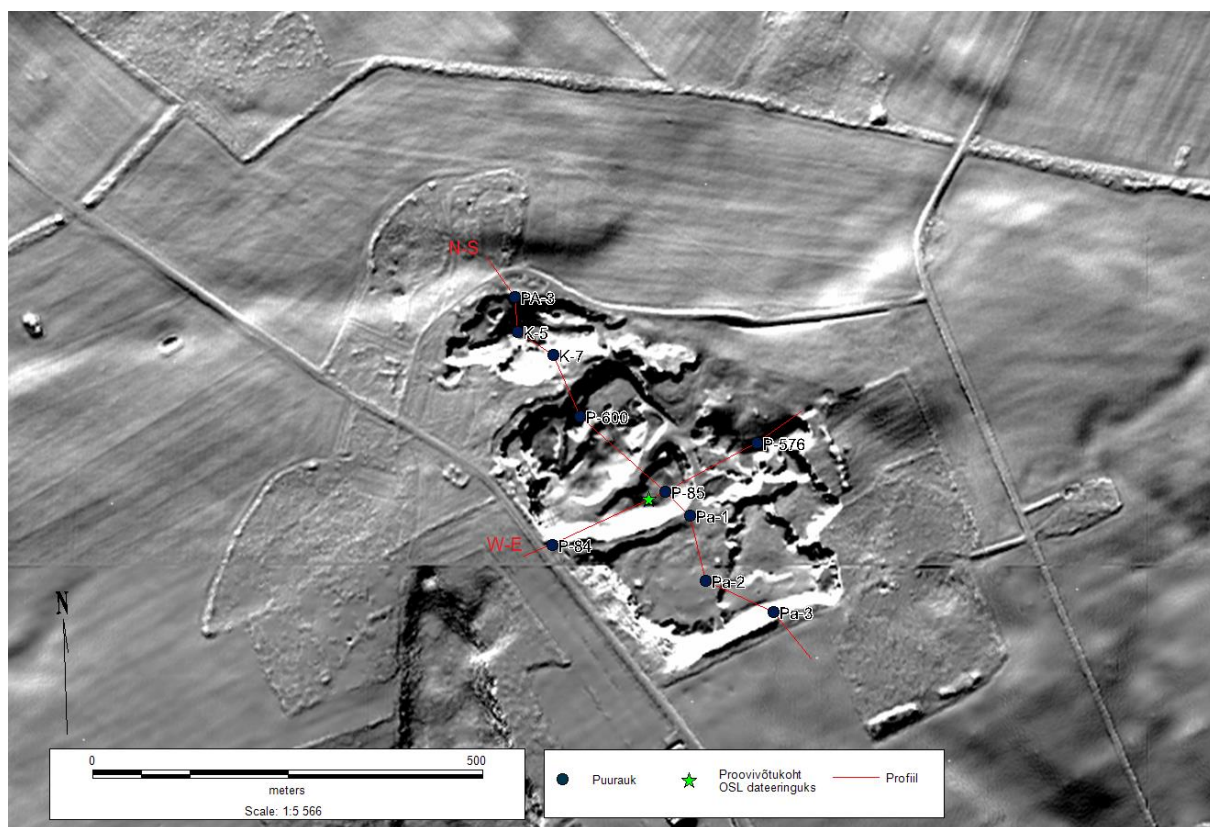


Joonis 5. Kirde-edelasuunaline ristprofiil Lõuniku karjääris (Aegviidu NE-SW profiil) koos puuraukude asukohtade ja läbilõigetega (Toom 1992). Profiili asukoht asub Joonis 3 ning puuraukude kirjeldused Lisa 1.

Pinnavormi morfoloogiliste ja geoloogiliste tunnuste põhjal võib väita, et tegemist on fluviomõhnaga, mis paikneb mõhnastikus. Mõhn on ilmselt tekkinud irdjääpangaste väljal liustikuserva lähedal jää sulades pangaste vahele kuhjunud setetest. Irdjää kunagisi asukohti markeerivad Lõuniku mäe ümber paiknevad lohud, milledesse on tekkinud järved ja sood. Mõhn ning seda ümbritsev mõhnastik paiknevad Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndite vahelise ala Pandivere poolses osas Viitnalt lõunasse kulgeva mõhnastike ja ooside vöös (Arold 2005). Mõhnade dateerimisel OSL meetodiga on oht, et surnud jää pangaste vahele või alla settinud setted ei saanud piisavalt päevavalgust lõksude nullimiseks ning seega võivad näida vanemad (Raukas & Stankowski 2005). Dateerimise õnnestumisel peegeldaks hästi taanduva liustikuserva vanust.

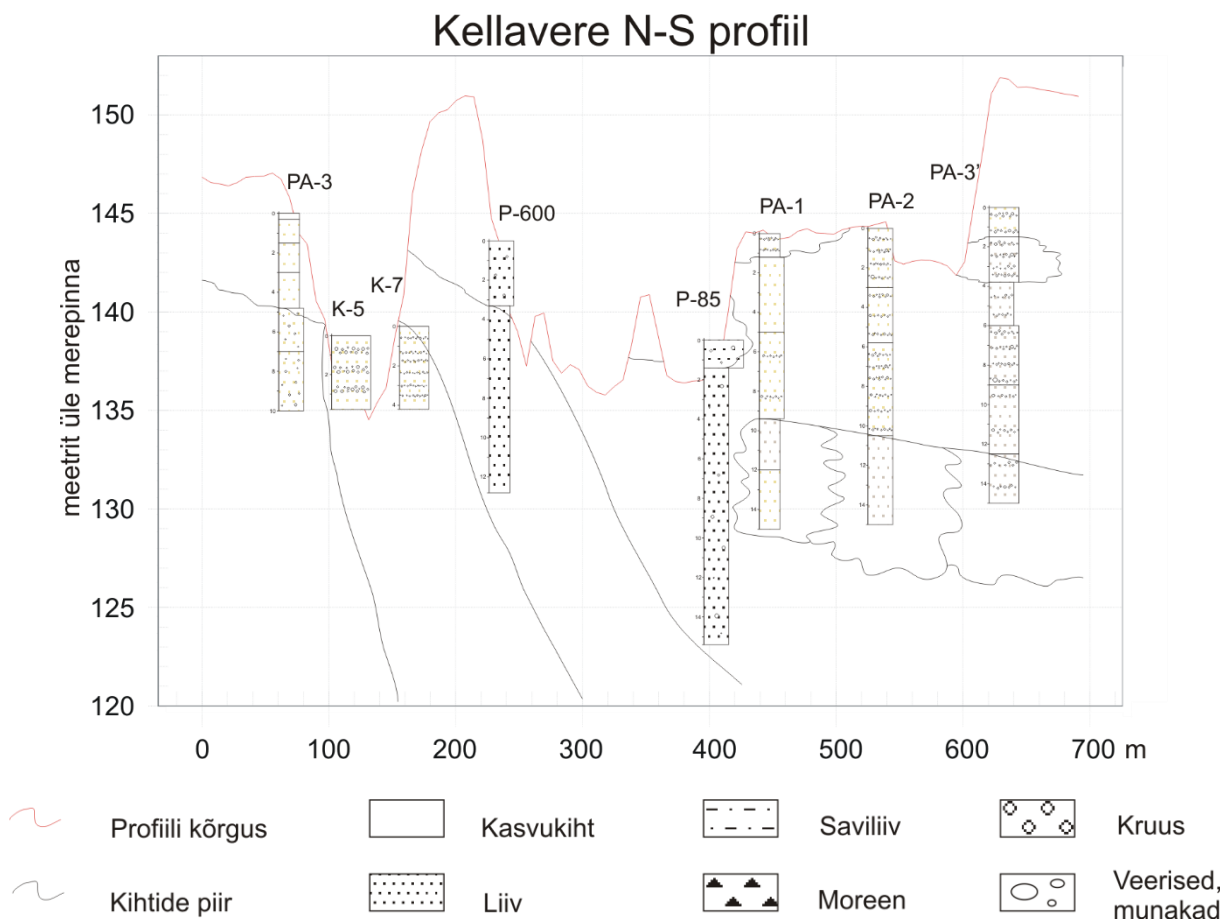
5.1.2. Kellavere

Kellavere uuringuala paikneb Kellavere külas, Laekvere vallas, Lääne-Virumaal (Joonis 2). Uuringuala moodustavad Veskimäe, Kuusemetsa, Veskimetsa ja Moora karjäärid, mis asuvad Kellavere mäe kirde osas. Lähim suurem asula on Laekvere, mis jääb umbes 3 km kagusse. Karjäärid piirnevad edelast ja lõunast Kellavere maastikukaitsealaga. Kellaverest lõunasse jääb Saadjärve voorestik, läände Järva-Jaani voored ning edelasse Emumägi. Uuringuala jääb Pandivere kõrgustiku ja Alutaguse madaliku maastikurajoonide piirile (Arold 2005).



Joonis 6. Kellavere uuringualal ning seda kirjeldavate profiilide asukohad. Profiili N-S läbilõige Joonis 7 ja profiili W-E läbilõige Joonis 8. Kaardi taustaks on LIDAR andmed.

Kellavere mägi asub Pandivere kõrgustiku kaguosas. Mäe ümbritseb lainjas tasandik. Kellavere mäe absoluutne kõrgus on 156 m ning suhteline kõrgus u 50 m. Pikliku kujuga mägi on loode- kagusuunaline ning laugete nõlvadega (keskmiselt 1-5°). Kuna uuringualal tegutseb neli karjääri, on Kellavere mäe looduslik ilme rikutud (Joonis 6).

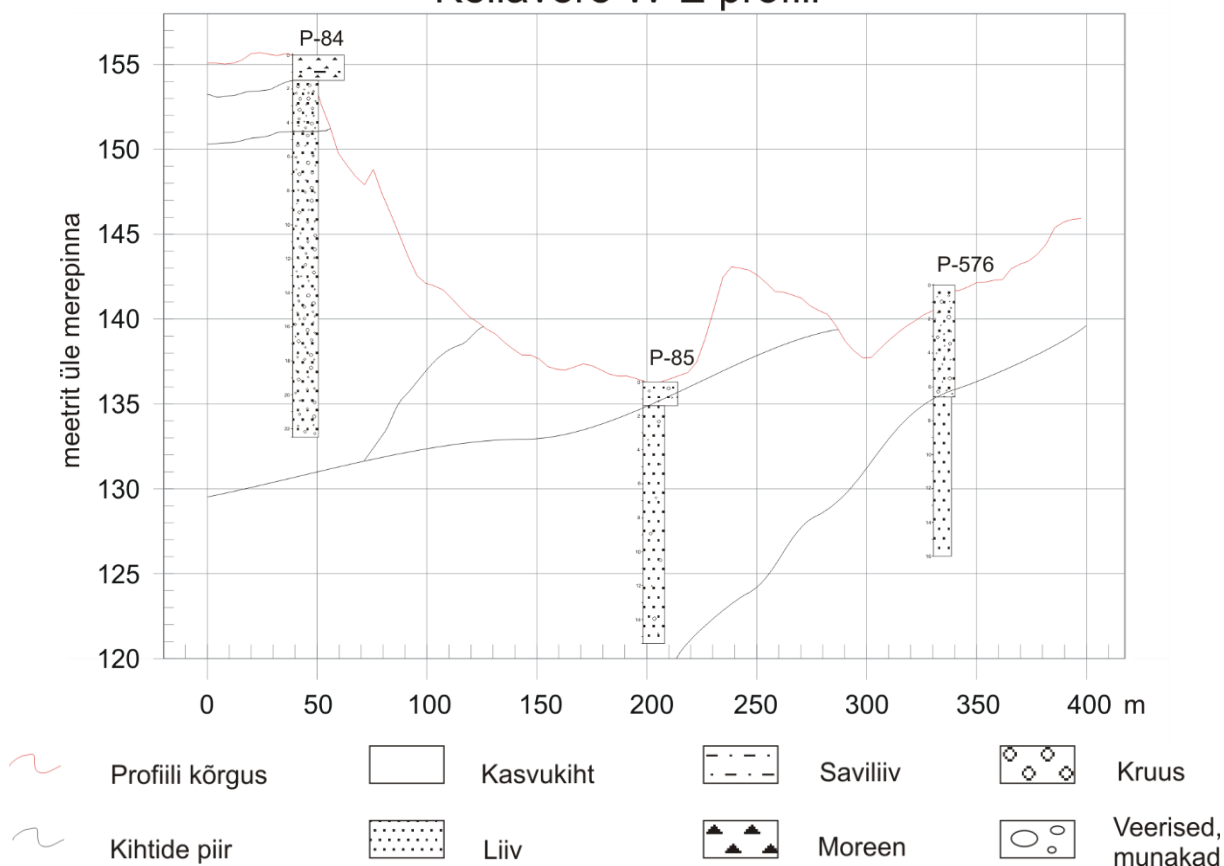


Joonis 7. Kellavere uuringuala põhja-lõunasuunaline pikiprofiil (Kellavere N-S) koos puuraukude asukohtadega ja läbilõigetega (Viru 1994; Rammo & Karimov 2010; Rammo 2010). Mustad jooned profiili läbilõikes tähistavad erinevate omadustega liiva kihte. Profiili asukoht Joonis 6 ning puuraukude kirjeldused Lisa 4.

Kellavere uuringuala kirjeldavad kaks profiili, põhja-lõunasuunaline pikiprofiil ja lääne-idasuunaline ristprofiil (Joonis 7 ja Joonis 8). Profiilid on koostatud 10 puuraugu andmetel, neist P-85 on profiilidele ühine (Viru 1994; Rammo & Karimov 2010; Rammo 2010). See puurauk ulatub ka kõige sügavamale, 16,7 m sügavusele. Mõlema profiili läbilõigetes moodustuvad erineva lõimisega liivade kihid, mis on põhja ja ida suunas kaldu. Kruusa esineb kas liivaga segamini või vahekihtidena liivas. Samuti on osa kihte suure aleuriidisaldusega.

Põhja-lõunasuunal esinevad läbilõigetes peene-, jämeda- ja aleuriitliiva kihid vaheldumisi. Ülemise, peeneteralise liiva kihi peal lasuvad jämedateraline liiv P-85 läbilõikes ning aleuriitliiva kiht PA-1 läbilõikes. Peeneteralise liiva sees on aleuriitliiva kiht PA-1 läbilõike alumises osas, kruusata peeneteralise liiva kiht PA-2 põhjas ning rohke kruusaga segateralise liiva kiht PA-3' ülemises otsas ning suure aleuriidisaldusega üksikute kruusateradega segateralise liiva vahekiht sama puuraugu alumises osas.

Kellavere W-E profiil



Joonis 8. Lääne-idasuunaline ristiprofiil (Kellavere W-E) koos puuraukude asukohtadega ning läbilõigetega Kellavere uuringualast (Viru 1994). Mustad jooned profiili läbilõikes tähistavad erinevaid liivakihte. Profiili asukoht Joonis 6 ning läbilõigete kirjeldused asuvad Lisa 4.

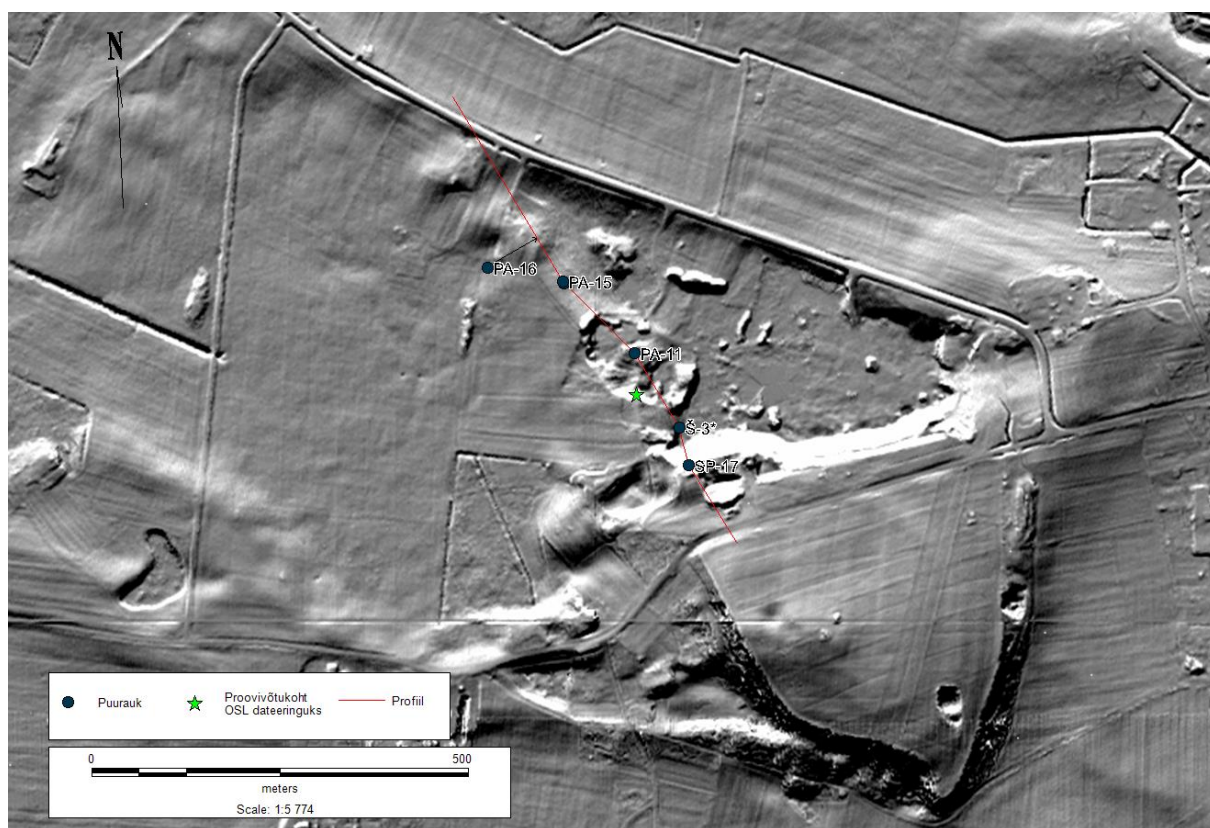
Lääne-idasuunal on kihtides domineerivateks liiva lõimisteks keskmise- ja jämedateraline liiv PA-85 läbilõike ülemises kihis, peeneteraline liiv ning aleuriitliiv P-576 läbilõike lõpus. P-84 keskmiseteralist liiva ja ka tervet Kellavere katab punakaspruun saviliiv moreen kuni 3,3 m paksuselt (Rammo 2010).

Kellavere mägi on voore-laadne pinnavorm, mis on tekkinud liustiku liikumisel üle glatsiofluviaalsete setete. Mägi kattev punakaspruun moreen kuulub Võrtsjärve alamkihistusse ning seega pidid glatsiofluviaalseid setted tekkima varases Kesk-Weichselis, sest sarnane moreen katab glatsiofluviaalseid setteid Valgjärve kihistul ka Saadjärve voorestikus (Rattas & Kalm 2001). Seega tähistab pinnavorm eelmise Skandinaavia liustiku taanduvat serva. Glatsiofluviaalsete setete settimiskeskkond oli arvatavasti muutuva voolutugevusega. Kõrge aleuriidisaldusega kihid on iseloomulikud aeglase või olematu vooluga keskkonnale, nagu seda on jääjärved. Segateraline liiv ning kruusakihtid iseloomustavad hästi aga tugevama vooluga keskkonda. Erineva terasuurusega liivakihtide kallakus ning aleuriitsete setete

olemasolu võiks viidata glatsiofluviaalsele deltale, mis distaalses osas tihti jääjärvetasandikuks muutub. Kuna glatsiofluviaalsed deltid moodustuvad liustiku vahetus lähedusse, siis peegeldaks dateering hästi liustiku serva seisaku aega. OSL dateeringuks on delta setted head, sest settimiskeskkond on väljaspool liustiku ning lõksude nullimiseks enne settimist on piisavalt aega.

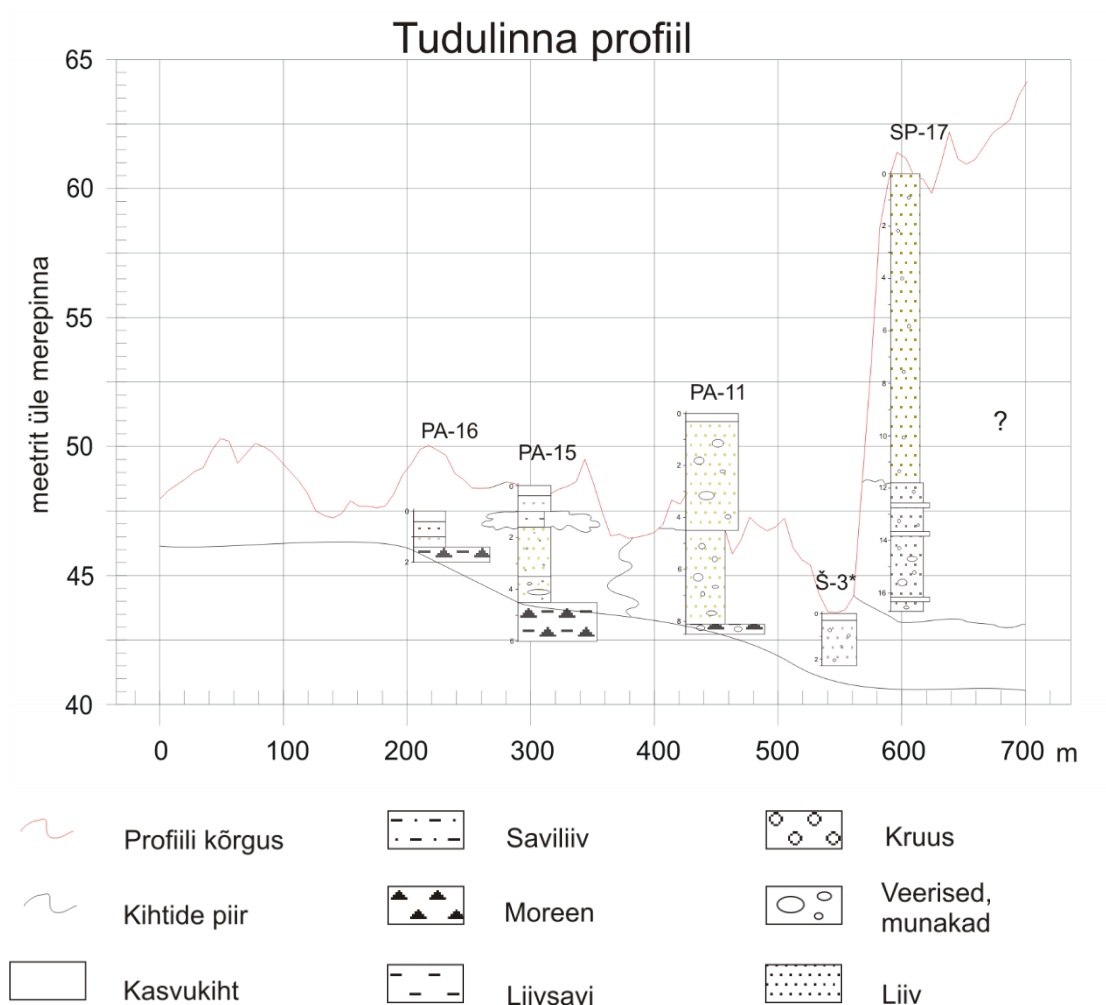
5.1.3. Tudulinna

Uuringuala paikneb Tudulinna aleviku idaservas, Tudulinna vallas, Ida-Virumaal (Joonis 2). Karjäär paikneb Rakvere-Rannapungerja maantee ääres ning on osa Tudulinna Linnamäest. Linnamäest idas voolab tugevalt meandreeruv Tagajõgi, mis suubub allavoolu Rannapungerja jõkke. Linnamäest natuke maad põhjas asub Muraka raba, idas Lemmaku soo ning lõunas Tudulinna raba. Tudulinna kirdes asub Pandivere servamoodustiste kompleks Iisaku-Illuka oosistiku ja Kurtina mõhnastikuga. Tudulinna Linnamägi, koos selles paikneva karjääriga jääb Alutaguse madaliku maastikurajooni (Arold 2005).



Joonis 9. Tudulinna uuringuala ning seda kirjeldava profiili asukoht. Profiili läbilõige Joonis 10. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljeefimudel.

Uuringuala jääb madalale loode-idasuunalisele kõrgendikule, mida ümbritseb tasane maa (Joonis 9). Selle kõrgeima osa moodustab pealt lame Linnamägi, mille absoluutkõrgus on 69 m ning suhteline kõrgus jääb 15-20 m vahele. Kõrgendiku Linnamäe poolne nõlv on väga järsk. Mäe karjääripoolne, põhjasuunaline nõlv on 25°–46° kaldega, igasuunaline nõlv 8°–32° ning edelanõlv 15°–30° kaldega. Linnamäe kagu osas on u 5 m diameetriga ning 6 m sügvune lohk.



Joonis 10. Tudulinna karjääri profiili puuraukude asukohad ja läbilõiked (Einmann 2006; Kukk 2009). Profiili asukoht Joonis 9 ja läbilõikete kirjeldused Lisa 7.

Tudulinna karjääri kirjeldab neljast puuraugust ja ühest karjääri seina kirjeldusest koosnev põhja-lõunasuunaline profiil (Joonis 9) (Einmann 2006; Kukk 2009). Eriteraliste glatsiofluviaalsete setete all lamab liivsavi moreen, mille pealispind sügavneb lõunasuunas (Joonis 10). Profiili põhjapoolses osas paikneb see u 46 m ü. m. p., alanedes linnamäe suunas kuni u 41 m ü. m. p. Moreeni katab peeneteraline põimjaskihiline liiv, mis ülespoole muutub järjest jämedamateraliseks. Profiili läbilõikes on iseloomulik liiva terasuuruse ning savikuse, aga ka kruusa, munakate ja veeriste sisalduse kasv linnamäe suunas. Linnamäe poolse SP-17

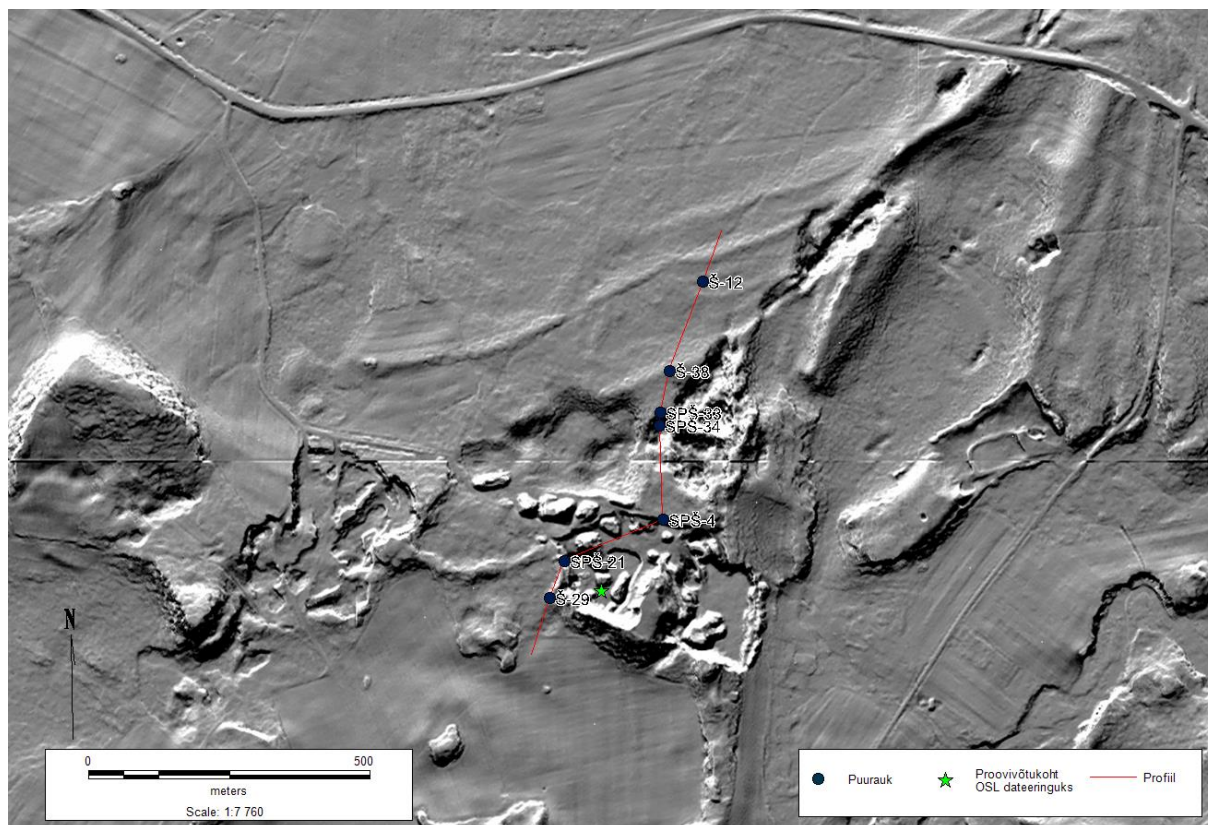
puuraugu pealmises kihis on vana karjääri rekultiveerimise käigus ümbertõstetud materjal-savikas, peent kruusa sisaldav väga peen liiv.

Uuringuala asub Pandivere servamoodustiste vööndi idaosa lõunatipus. Tudulinna Linnamäe puhul on tegemist glatsiofluviaalse deltaga, mis on settinud seisva liustiku serva ette jääjärve. Tegemist on arvatavasti liustiku kontaktil tekkinud deltaga, sest neile on iseloomulikud järsud liustikuserva poolsed nn kontaktnõlvad ning sulglohud delta proksimaalses osas, mis on tekkinud mattunud jää sulamisel. Seda tüüpi deltagad on väga kasulikud liustikuserva seisakute ajalisel määramisel ning veetasemete määramisel (Benn & Evans 2010). Kuna settimine on toimunud liustikuserva ees, siis on võimalik, et sete on piisavalt päevavalgust saanud. OSL dateerimise ohuks võib siinkohal olla settimiskeskkonna liiga sügav vesi, mille tõttu ei pruugi setteni jõuda piisaval määral valgust elektronlõksude tühjenemiseks.

5.1.4. Vahelaane

Vahelaane uuringuala asub Anija vallas, Harjumaal (Joonis 2). Vahelaane karjäär paikneb Vetla ja Voose külade vahel, Raasiku-Jäneda teest lõunas. Karjäärist idas lõikab maastiku Jõelähtme jõe säng. Jõgi on ka Kõrvemaa maastikukaitseala läänepiiriks. Seal paiknevad Taganurga mõhnastik, Kakerdaja raba ja sellest natuke põhjas Mägede mõhnastik koos Valgehobusemäega, mille absoluutkõrgus on 106 m. Vahelaanest lõunas on Põhjaku raba, mille idakülge pidi kulgeb kagusse Voose-Matsimäe oosistik. Vahelaane jääb Kõrvemaa tasandiku maastikurajooni piiresse (Arold 2005).

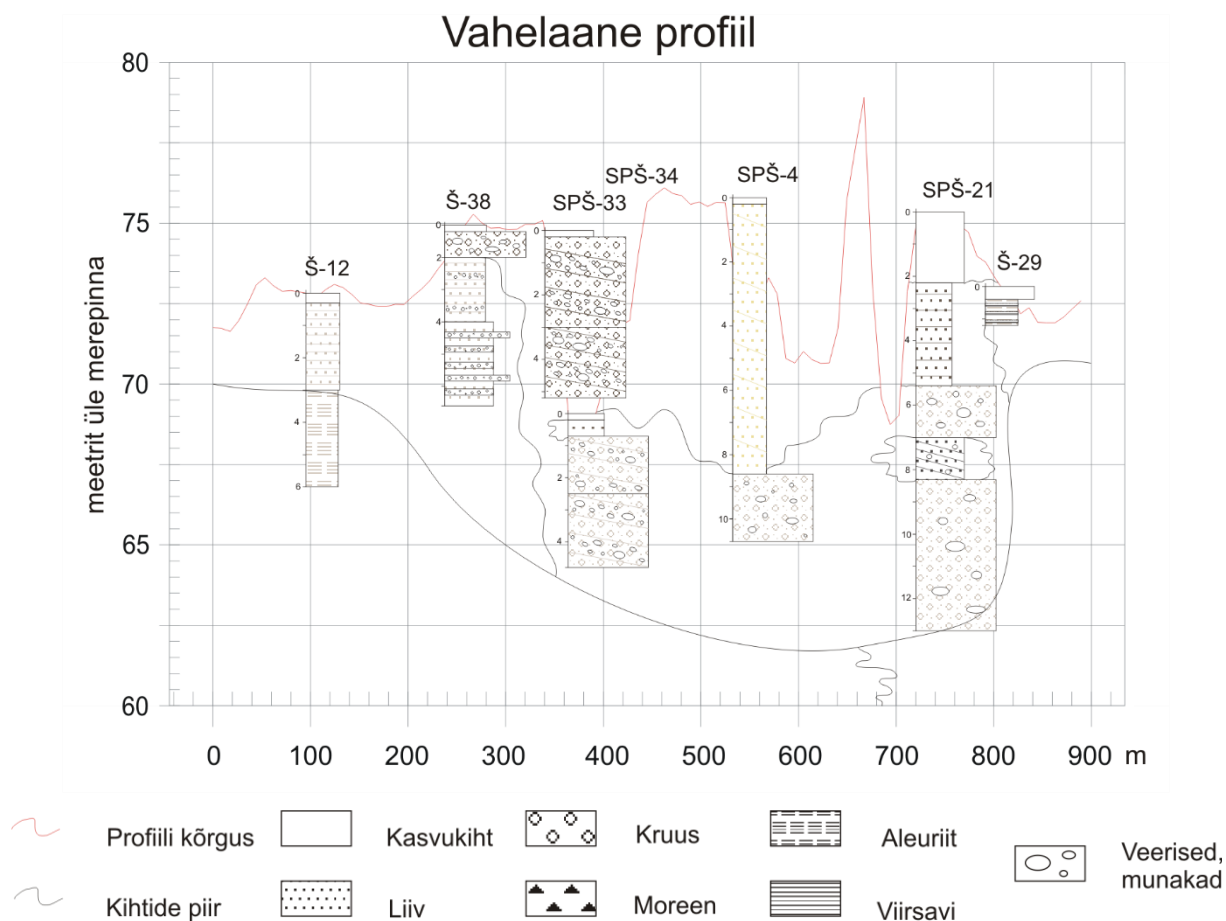
Vahelaane uuringuala paikneb lainjal tasandikul, mille looduslikku pinda on rikkunud karjäärid (Joonis 11). Uuringuala on väga liigestatud- looklevad vallid vahelduvad suuremate ja väiksemate küngastega nii lääne-, ida- kui ka lõunasuunaliselt. Karjääri alale jääva kõrgeima punkti absoluutseks kõrguseks on 85 m ü. m. p. Karjääri ümbritseva ala absoluutkõrgused jäävad vahemikku 61–100 m ü. m. p., tasandiku absoluutkõrgus on 65-70 m ü. m p. Raasiku-Jäneda teest lõunasse jääva ala kõrgendikud ning vallseljakud on valdavalt kirde-edelasuunalised.



Joonis 11. Vahelaane uuringuala ja karjääri kirjeldava profiili asukoht. Profiili läbilõige Joonis 12. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljeefimudel.

Vahelaane karjääri põhja-lõunasuunaline geoloogiline läbilõige on koostatud seitsme puuraugu andmetel (Joonis 12) (Einmann & Aigro 2009; Killing jt 2008). Eriteraliste glatsiofluviaalsete liivade ja kruusa all on puurimisel kirjeldatud aleuriiti, mis profiili lõunaosas sisaldab korduvaid 3-10 cm paksuseid kerge saviliiva koostisega viirsavi vahekihte. Viirsavide varvid on pruuni ja halli värvusega ning 0,3-0,7 cm paksused. Aleuriidi kihti katab profiili põhjaosas horisontaalkihilise tekstuuriga ülipeeneteraline liiv, mis lõunasuunas muutub kruusakamaks või peenkruusa kihte sisaldavaks liivaks. Puuraukude SPŠ-33, SPŠ-34, SPŠ-4 ja SPŠ-21 esineb kuni 2m paksuselt jäme- kuni peeneteralist liiva. Puuraugus SPŠ-33-s on jälgitav kruusas sisalduvate hästi kulutatud, isomeetriliste ja venitatud kujuga kruusaterade, veeriste ja munakate 30-60 cm kihtide kaldkihilisus itta 5° nurga all. SPŠ-34 on kruusa kihtides näha halvasti, keskmiselt ja hästi kulutatud isomeetrilise ja lapiku, vähem venitatud kujuga kruusa, veeriste ja munakate nõrka kaldkihilisust itta. SPŠ-4 lasub keskmiselt ja hästi kulutatud lapiku ja venitatud kujuga kruusa, veeriste ja munakate peal kaldkihilise tekstuuriga aleuriitliiva kiht. Aleuriitliiva kihtide paksused on jäävad vahemiku 0,8-3,0 cm. SPŠ-21 läbilõikes on kruusakihtide vahel keskmiseteralise ning üksikuid kruusateri sisaldava liiva kiht. Ka seal on jälgitav kaldkihiline tekstuur, kus kihtide paksused on 0,5-1,5 cm. Sama läbilõike ülemine,

karjäärilt kooritud mullakihi all olev väga peeneteralise liiv on aga horisontaalkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,2-0,8 cm.



Joonis 12. Vahelaane uuringuala profiili puuraukude asukohad ning läbilõiked (Einmann & Aigro 2009; Killing jt. 2008). Profiili asukoht Joonis 11 ja puuraukude kirjeldused Lisa 8.

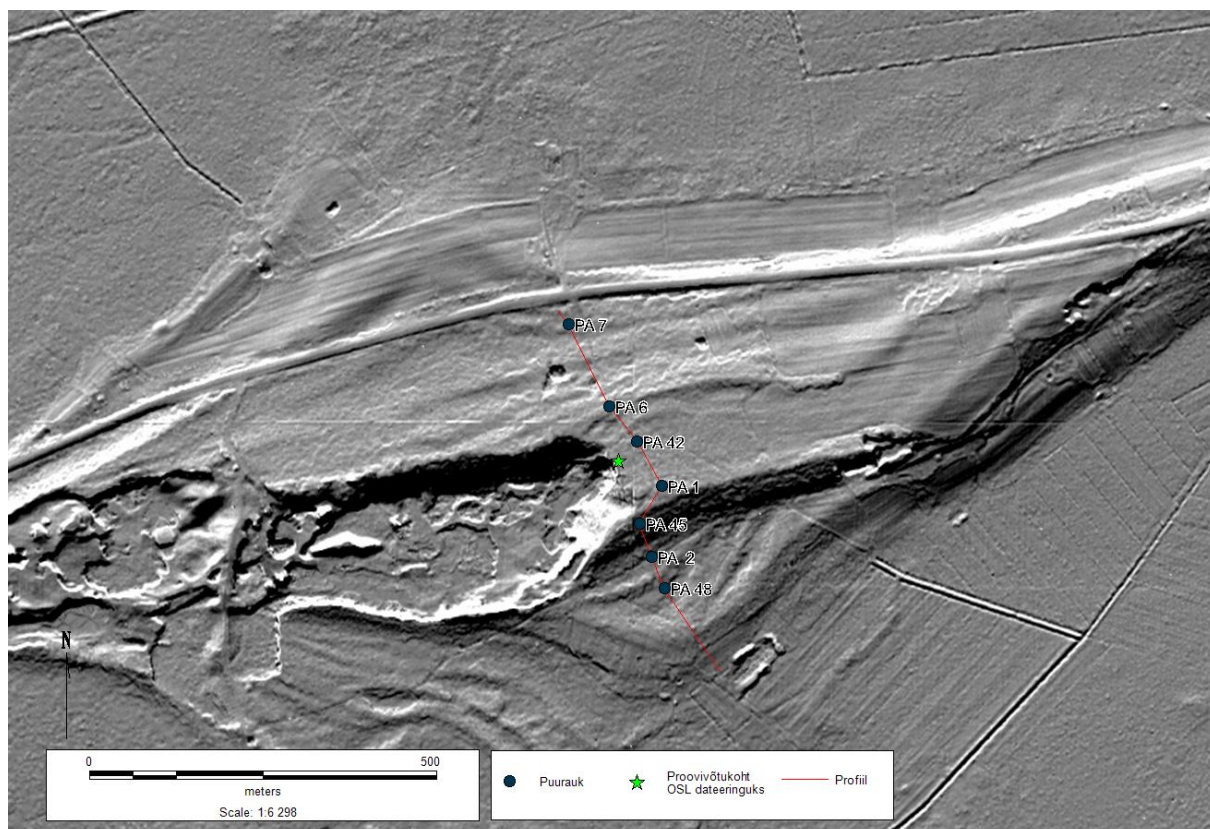
Antud pinnavormi puhul on tegemist glatsiofluviaalse deltaga, mis on tekkinud liustikuserva ette jääjärve peeneteralistele ja savikatele setetele. See paikneb Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndite vahel ning on osa Viitnalt edelasse lookleva ooside ja mõhnastike süsteemist. Uuringuala settimiskeskond on seetõttu olnud vahelduv. Delta on settinud liustiku esisesse jääjärve, milles leidub ka irdjää panku. Võib arvata, et liustikualune tunnel, kus deltast lõunas asuv Voose-Matsimäe radiaalne oos tekkis, on ka delta suudmeks olnud. OSL dateeringuks sobivad kõige paremini delta peeneteralsed liivad, mis on aeglasema voolu tingimustes settinud.

5.2. Palivere servamoodustiste vöönd

5.2.1. Jaakna

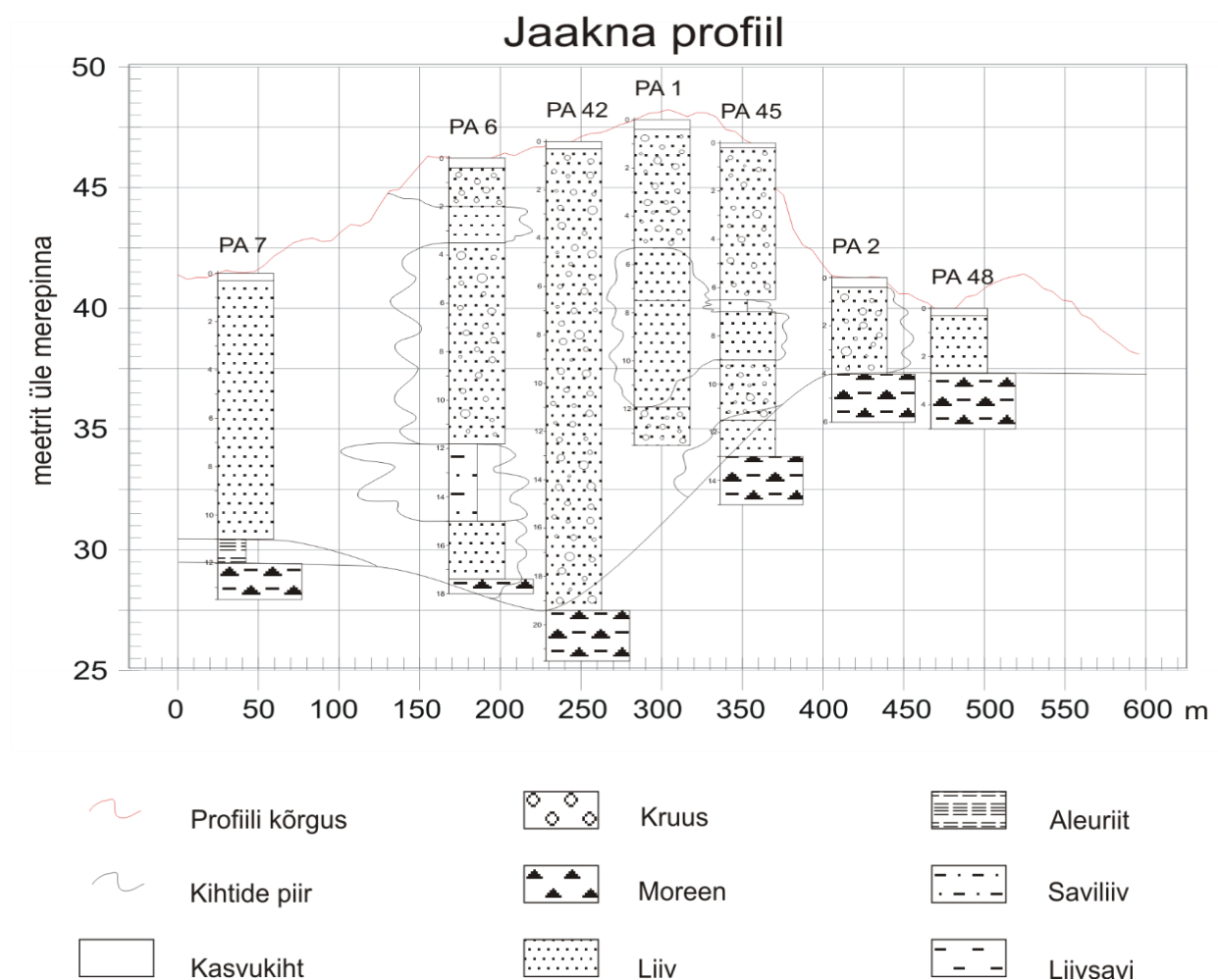
Jaakna uuringuala asub Jaakna külas, Lääne-Nigula vallas, Läänemaal. Jaakna karjäär paikneb Ääsmäe-Haapsalu-Rohuküla maantee ääres Risti aleviku ja Palivere aleviku vahel (Joonis 2). Jaaknast loodesse jääb Palivere raba, lõunasse aga Marimetsa raba. Põhjas ja lõunas voolavad paralleelselt maantee Vihterpalu ja Taebla jõgi. Jaakna karjäär paikneb lääne-idasuunalisel vallseljakul Palivere ja Risti vahelisel alal. Karjäär jääb Lääne-Eesti tasandiku maastikurajooni (Arold 2005).

Uuringuala piirneb soise tasandikuga. Vähemalt 10 km pikkuse lääne-idasuunalise lavaja vallseljaku Jaakna ümbruse osa absoluutne kõrgus on 54 m ü. m. p. ning suhteline kõrgus kuni 20 m (Joonis 13). Vallseljaku proksimaalse ehk põhjapoolse nõlva kalle jääb vahemikku 1–8° ning distaalse ehk lõunapoolse nõlva kalle on 6–18°. Profiilist läänes on vallseljaku looduslik ilme karjääride tõttu rikutud.



Joonis 13. Palivere uuringuala ja seda iseloomustava profiili asukoht. Profiili läbilõike Joonis 14. Kaardi taustaks on LIDAR andmed.

Jaakna karjääri kirjeldav loode-kagusuunaline ristprofiil on koostatud seitsme puuraugu andmetel (Joonis 14) (Peikre 1992). Jaaknas lasuvad glatsiofluviaalsed setted ebaühtlase pinnaga liivsavi moreenil. Puuraugu PA 7 läbilõikes asub moreen 12 meetri sügavusel, ehk 29,5 m ü. m. p. ja puuraugus PA 42 paikneb see 27,5 m ü. m. p. ning tõuseb taas puuraukude PA 2 ja PA 48 läbilõigetel 37,4 m-ni ü. m. p. Moreeni peal lasub profiili loodeosas 1 m paksune aleuriidikiht, mille peal lasub liiva kiht, mis PA 6 läbilõikes asendub kruusaka liivaga. Pinnavormi keskosas domineerib kruusakas liiv, milles (PA 1 ja PA 45) leidub ka 1,5-6,6 m paksuseid puhta liiva vahekihte. Kruusakas liiv asendub profiili kaguosas, PA 48 läbilõikes, kesk- kuni jämeteralise liivaga. PA 6 ning PA 45 läbilõigetel leidub vastavalt 1,2 m ja 0,5 m paksuseid saviliiva vahekihte.



Joonis 14. Profiil puuraukude asukohtade ja läbilõigetega Jaakna karjäärist (Peikre 1992). Profiili asukoht Joonis 13 ja puuraukude kirjeldused Lisa 2.

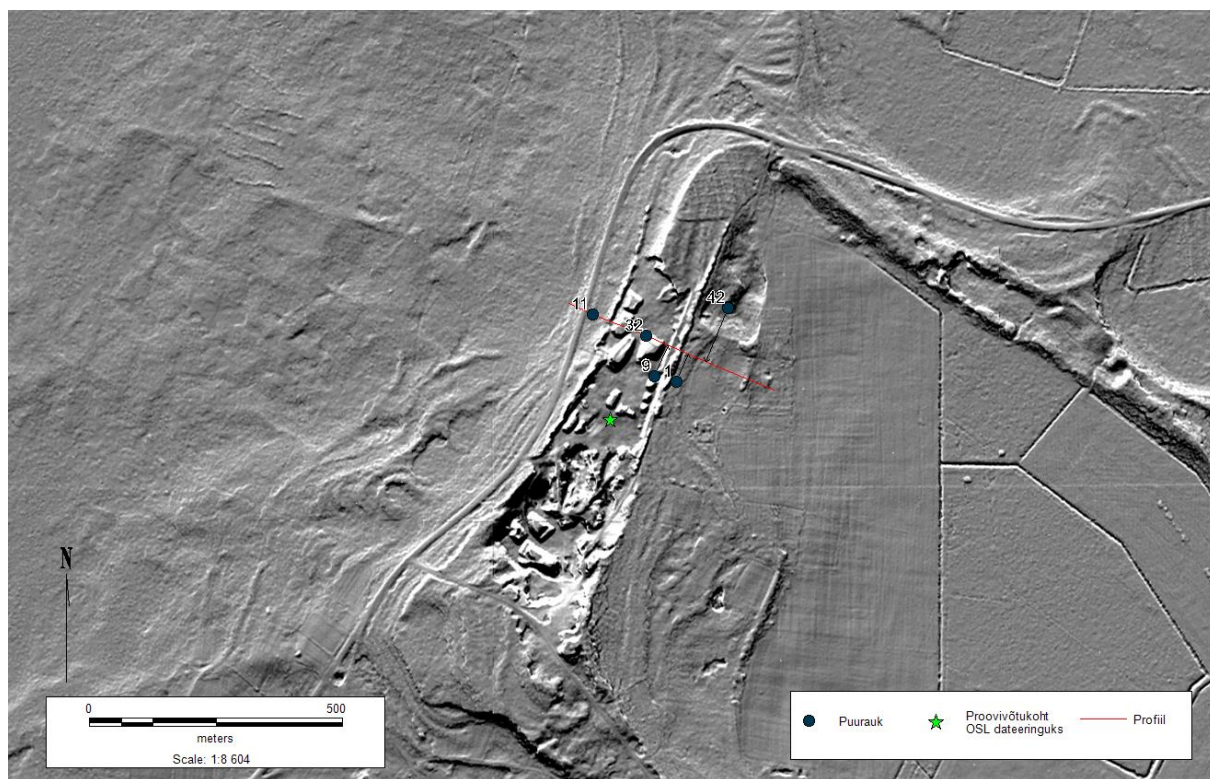
Tegemist on marginaalse oosiga, mis märgib Palivere servamoodustiste vööndit. Oos on tekkinud liustikuserva ees kitsaste deltade ühinemisel. Raukas (1977, 1992) on kirjeldanud marginaalset oosi kui asümmeetrilise ristprofiiliga glatsiofluviaalset deltat, mille proksimaalne

ehk liustiku serva poolne külg on järsema nõlvakaldega (7–15°) kui distaalne osa (5–10°). Palivere marginaalse oosi asümmeetria on aga vastupidine. Võimalik, et oos tekkis glatsiofluviaalsete setete kuhjumisel liustikuserva ees aluspinnas oleva otsamoreeni taha, mis liustiku pealetungil moodustus. Setetest võib järeldada, et settimiskeskkond oli pigem kiirevooluline, kus liustiku sulamisveed kandsid liustikuserva ette kokku rohkelt kruusa sisaldavaid setteid. Setete tekstuuri kohta andmed puuduvad (Peikre 1992).

Ühelt poolt peegeldaks OSL dateering marginaalsest oosist suurepäraselt liustikuserva seisaku aega, teisalt on oht, et liustikuga vahetul kontaktil settinud setted ei saanud piisavalt valgust ning seetõttu võivad dateeringud olla ebatäpsed.

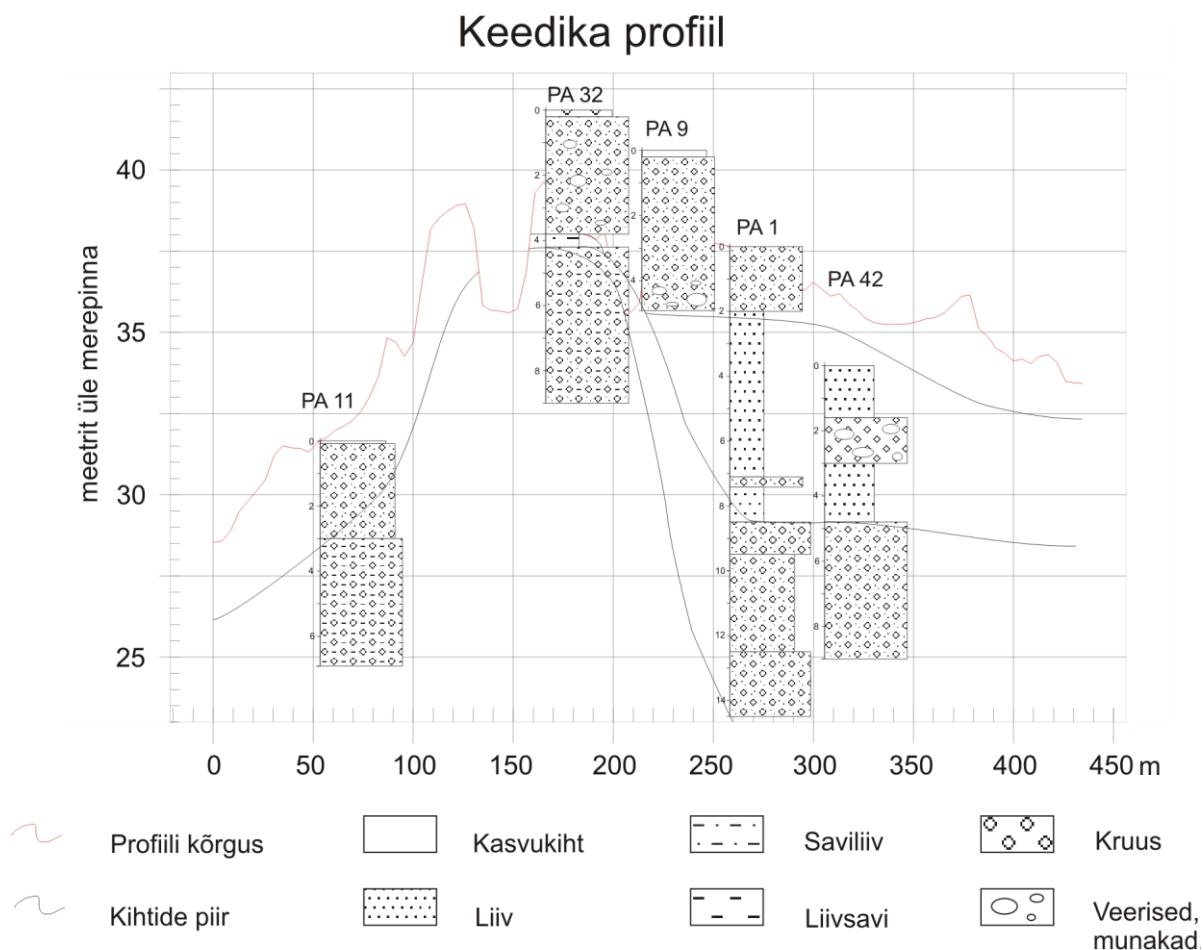
5.2.2. Keedika

Keedika uuringuala asub Lääne-Nigula vallas, Läänemaal. Keedika karjäär paikneb samanimelises külas, Keila-Haapsalu maantee ääres (Joonis 2). Keedikast loodesse jääb Leidissoo ning lõunasse, 8 km kaugusele, Palivere alevik. Uuringuala ümbritsevad Läänemere vanad rannamoodustised. Keedika karjäär jääb Lääne-Eesti tasandiku maastikuregiooni, Nõva nõo ja Noarootsi nõo vahetus lähedusse (Arold 2005).



Joonis 15. Keedika karjääri ning seda kirjeldava profiili asukoht. Profiili läbilõike Joonis 16. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljeefimudel.

Uuringuala paikneb u 2 km pikkusel põhja-edelasuunalise lainelise pinnamoega kõrgendikul (Joonis 15). Selle absoluutne kõrgus on 39-49 m ü. m. p. ning suhteline kõrgus varieerub paarist meetrist 20 meetrini. Kõrgendiku kõrgeim osa asub edelaservas. Pinnavormi lõunanõlv on kuni 35° kaldega ning teistes ilmakaartes jääb see alla 10°. Pinnavormi keskosa looduslik ilme on kruusakarjääri tõttu rikutud.



Joonis 16. Keedika profiil koos puuraukude asukoha ning läbilõigetega (Rändur 2005). Profiili asukoht Joonis 15 ja puuraukude kirjeldused Lisa 3.

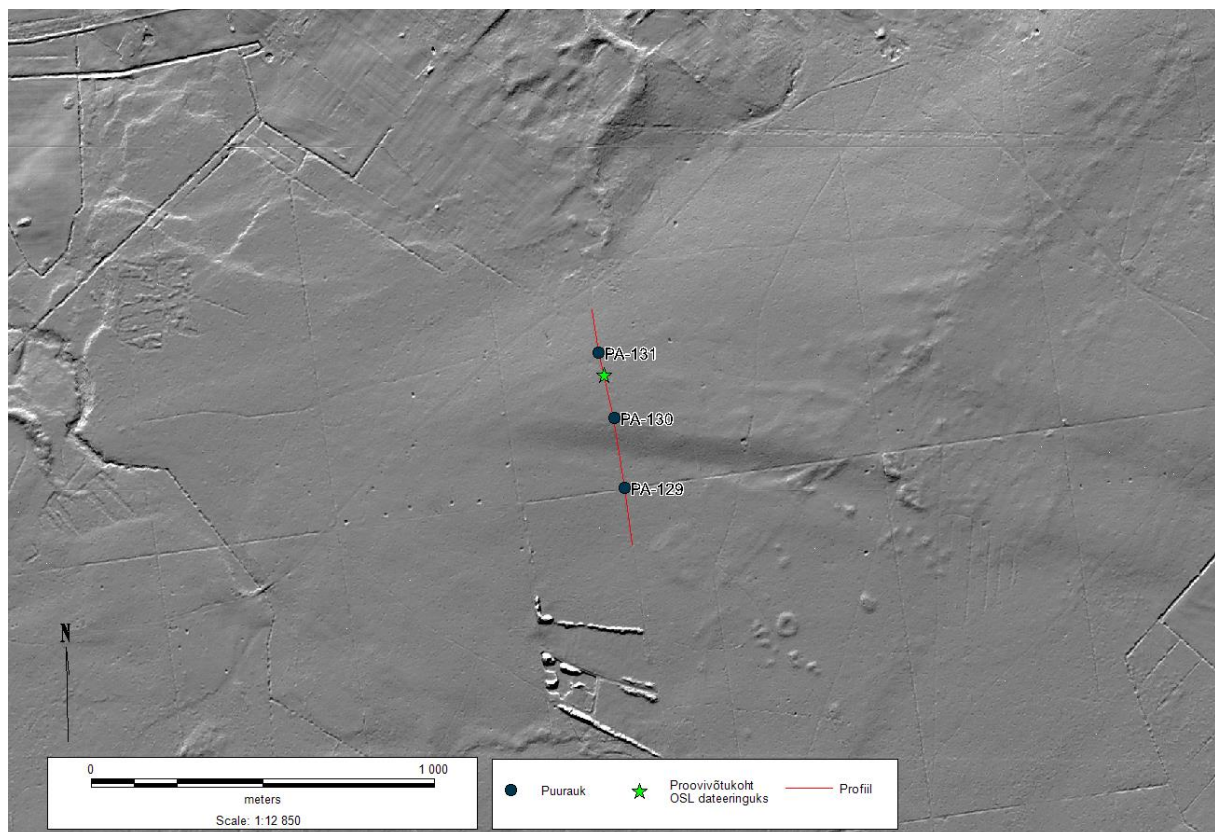
Keedika uuringuala loode-kagusuunaline geoloogiline läbilõige on koostatud viie puuraugu andmetel (Joonis 16) (Rändur 2005). Pinnavormi tuumiku moodustab savikas kruus, mis kohati on ka liiva lisandiga ning laugema loodepoolse nõlvaga. Tuumikut katva liivase kruusa sees on peeneteralise ja keskmiseteralise liiva vahekihid PA 1 ja PA 42 läbilõigetes. Neis on omakorda vastavalt kruusa-liiva ja veeristega jämeda kruusa kihid. Setete kirjeldustest võib järeldada, et materjal muutub ida-kagu suunas jämedamaterialisemaks.

Antud pinnavormi puhul on arvatavasti tegemist glatsiofluviaalse delta või settekuhikuga, mis on tekkinud valdavalt kiire aga samas kiiresti muutuva vooluga keskkonnas. Aruandes puudub

infomatsioon setete tekstuuri kohta, seega on raske pinnavormi määrata (Lisa 3) (Rändur 2005). Ka võib oletada, et aruandes kirjeldatud „savikas kruus liivaga“, mis antud pinnavormi tuumiku moodustab, on hoopis moreen. Sellisel juhul on delta moodustunud moreense kõrgendiku kagunõlvale. OSL dateeringuks võib antud pinnavorm olla ebasobiv, sest sisaldab vähe liiva. Dateerimiseks sobiks kasutada profiili kaguosas olevat peene- ja keskmiseteralist liiva.

5.2.3. Kuusalu

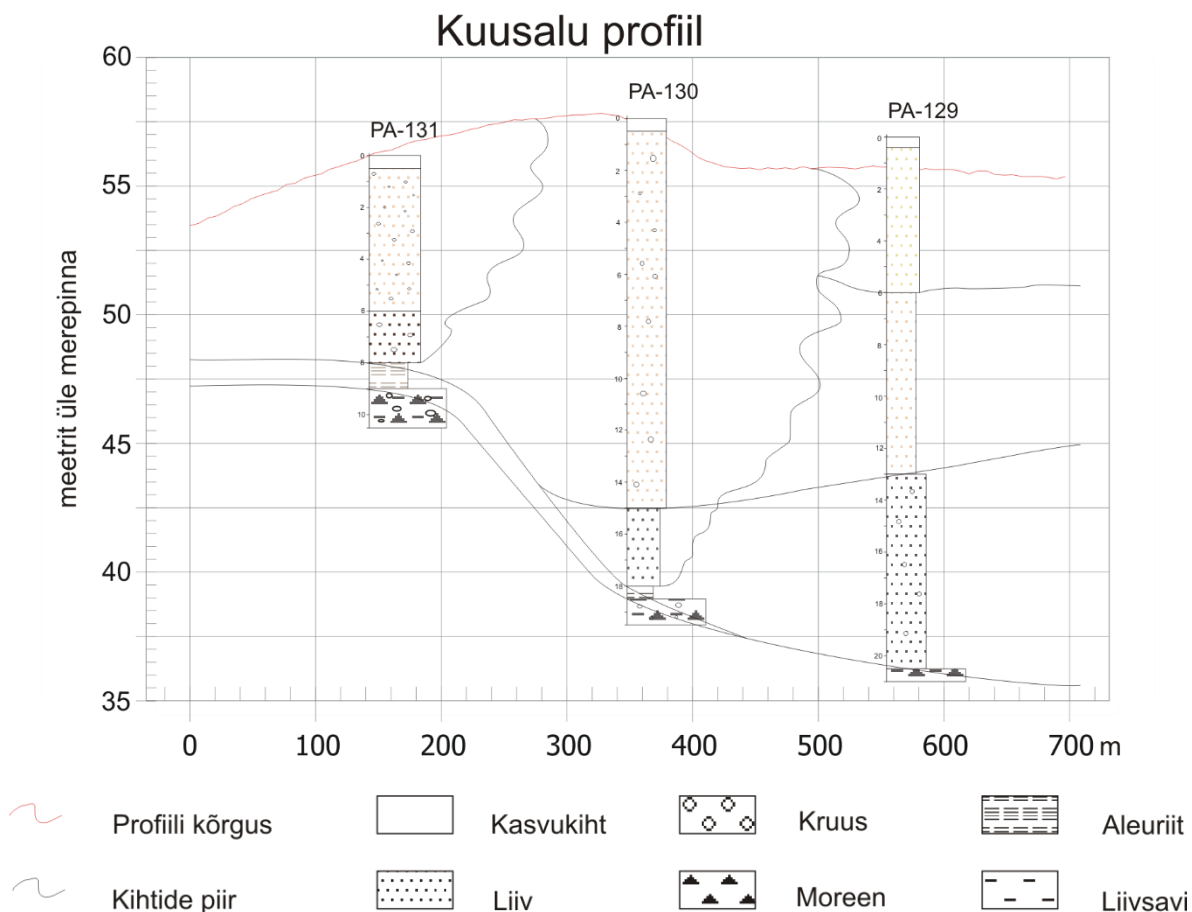
Kuusalu uuringuala asub Rehatse külas, Kuusalu vallas, Harjumaal (Joonis 2). Rajatavast Kuusalu 4. karjäärist jääb Kuusalu alevik põhja ning Kiiu alevik loodesse. Karjäärist läänes asub Kuusalu 3 liivakarjäär ning edelas Rehatse soo. Kuusalu karjäär asub Kõrvemaa maastikurajoonis (Arold 2005).



Joonis 17. Kuusalu uuringuala ja seda iseloomustava profiili asukoht. Profiili läbilõige Joonis 18. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljeefimudel.

Uuringuala paikneb tasandikul, mille absoluutne kõrgus on 60–65 m ü. m. p. (Joonis 17). Karjääri ala läbivad kaks kagusuunas kulgevat u 1 km pikkust paralleelset lainjat valli, mille absoluutkõrgus on kuni 70 m ü. m. p. Lõunapoolse valli distaalse nõlva kalle on kuni 2 °.

Karjäärist lõunas paiknevad paar poole meetri kõrguse valliga ümbritsetud lohku, mille diameeter on 40–70 m.



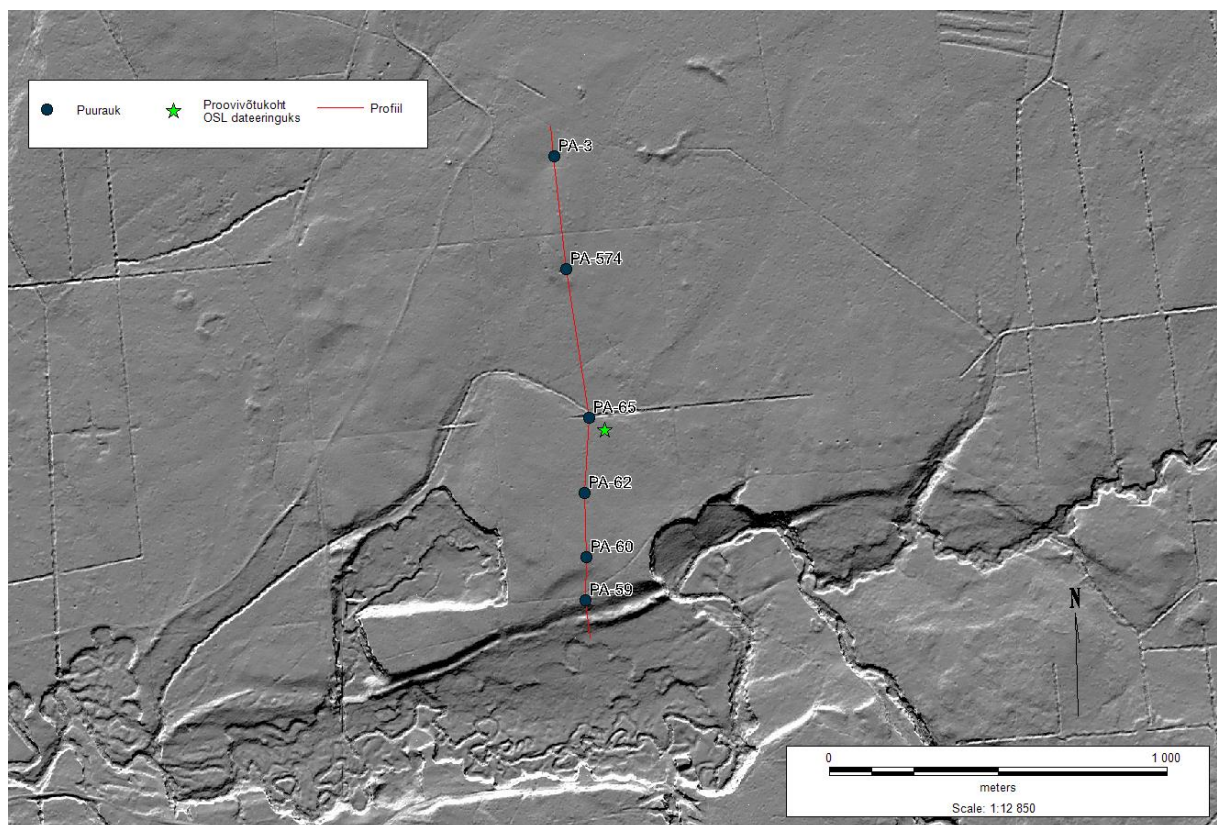
Joonis 18. Profiil koos puuraukude asukohtade ja läbilõigetega Kuusalu karjääris (Einmann 2007a). Profiili asukoht Joonis 17 ja puuraukude kirjeldused Lisa 5.

Kuusalu karjääri kirjeldab kolme puurauguga põhja-lõunasuunaline profiil (Joonis 17) (Einmann 2007a). Kuusalu karjääri uuringuala kirjeldav geoloogiline läbilõige on koostatud kolme puuraugu andmeil, mis kõik ulatuvad ebaühtlase pealispinnaga lasuva halli värvi tiheda moreenini (Joonis 18). Moreeni pealispinna langus on vähemalt 10 m. Moreeni peal lasub kuni 1 m paksune aleuriidikiht, mis ulatub profiili keskele. PA-131 on see kiht liivakas ning hallikasbeeži värvi, PA-130-s aga puhas homogeenne aleuriit, hall ja tihe. Nende peal lasub eriteraline liiv kuni 20,1 m paksusena. Liiva lõimis muutub profiili läbilõikes lõunasuunas ning ülevalt-alla peenemateralisemaks. Nii on PA-131-s beež ja kohvipruun jämedateraline liiv üksikute kruusateradega, PA-130-s keskmiseteraline kuni peeneteraline beež liiv üksikute kruusatükkidega ning PA-129-s kollakasbeež peeneteraline ning beež peeneteraline kuni väga peeneteraline liiv. Erandiks on moreenil ja aleuriidil lasuv alumine hall kiht, mis PA-130-st PA-129-sse muutub peeneteralisest ja tihedast liivast keskmiseteraliseks liivaks hajusa kruusaga.

Pinnavormi puhul on tegemist sanduriga. Sulglohud sanduritasandikul on tekkinud setete alla mattunud jääpangaste sulamisel. Madalad vallid võivad olla kas luited või suured viired, profiili läbilõikes puuduvad aga detailsed andmeid kihilisuse kohta, seega ei saa seda kindlalt väita. Settekeskkonnaks oli arvatavasti madala sügavusega veeline keskkond liustiku serva ees, kus peene- ja keskmiseteraliseid setted akumulēerusid päikesele avatud jääsulamisvee jõgedes. Need on väga head tingimused õige OSL vanuse saamiseks. Ohullikaks võib aga olla setete kiire settimine öösel, mistõttu ei saaks setted vajalikul määral valgust (Raukas 2009).

5.2.4. Soodla

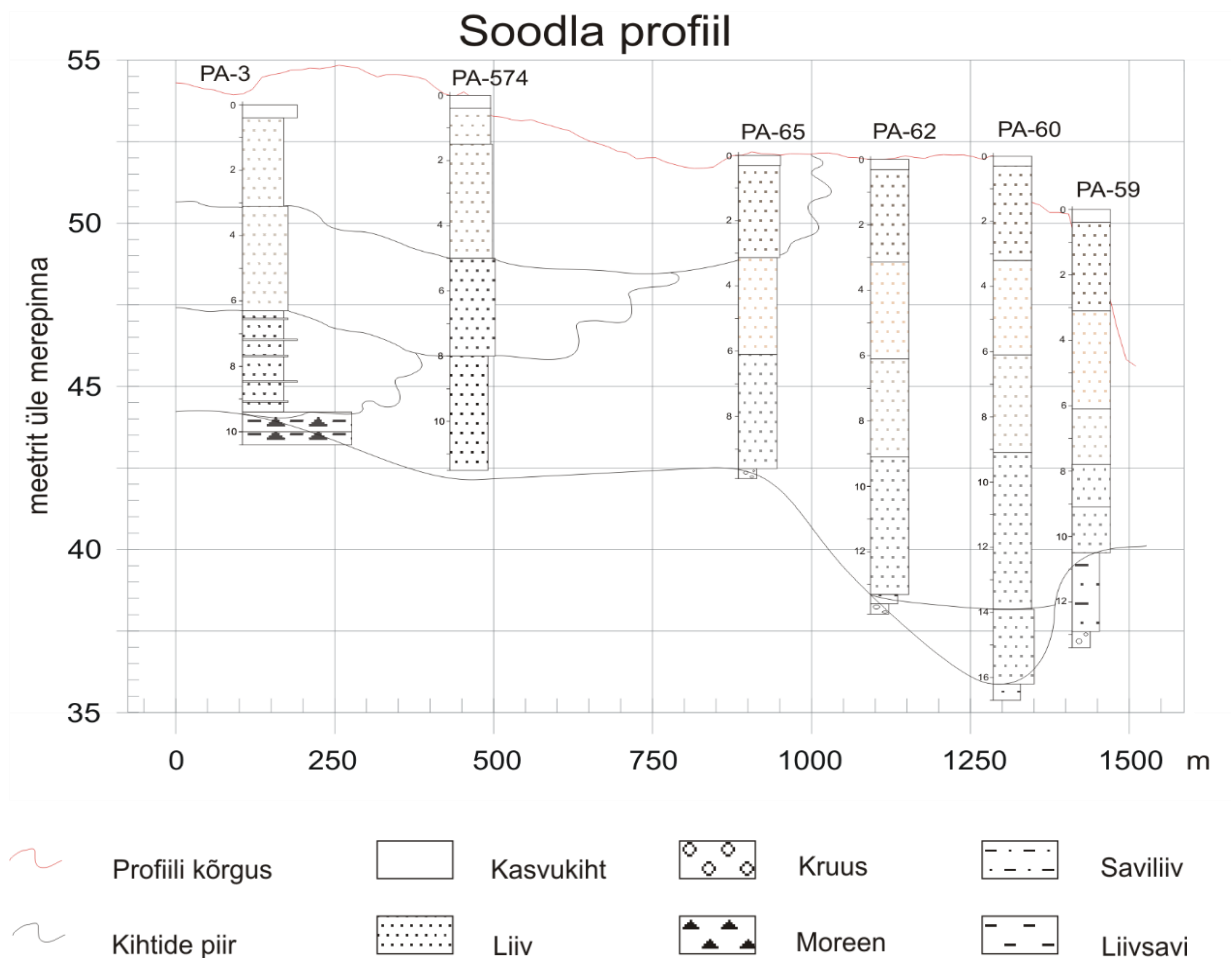
Soodla uuringuala asub Anija vallas, Harjumaal. Uuringuala paikneb Soodla külas, Piibe maantee ja Kiiu-Soodla tee vahel, vana Soodla karjääri kõrval (Joonis 2). Ala lõuna- ja idakülge piirnevad Soodla jõe meandeeruva sängiga, põhja suunda jääb aga Rehatse soo. Soodla karjäär asub Kõrvemaa maastikurajoonis (Arold 2005).



Joonis 19. Soodla uuringuala ja seda kirjeldava profiili asukoht. Profiili läbilõige Joonis 20. Kaardi taustaks on LIDAR andmetel põhinev reljefimudel.

Uuringuala jääb Kuusalu ja Soodla vahelise tasandiku lõunaossa, umbes 5 km kaugusele Kuusalu uuringualast (Joonis 19). Ala absoluutkõrgus jääb vahemikku 50–55 m ü. m. p.

Maapinna kõrgus kasvab lääne suunas. Karjäärist lõunas asuv Soodla jõe org paikneb u 10 m madalamal ning neid eraldava nõlva kalle jääb keskmiselt vahemikku 2-10°.



Joonis 20. Soodla karjääri profiil koos puuraukude asukohtade ning läbilõigetega (Einmann 2007b; Kotenjov & Kattai 2006). Profiili asukoht Joonis 19 ning läbilõigete kirjeldused Lisa 6.

Soodla uuringuala kirjeldav põhja-lõunasuunaline geoloogiline profiil on koostatud kuue puurangu andmeil (Joonis 20) (Einmann 2007b; Kotenjov & Kattai 2006). Sügavaim puurauk PA-60 ulatub 16,7 m sügavusele ja ulatub halli saviliiv moreenini, mis on lasuvate glatsiofluviaalsete setete lamamiks. Moreenil ja liivsavil lasuvad erineva löimisega liiva kihid, seejuures muutub löimis profiilis lõunasuunas peenemateralisemaks. Profiili põhjapoolses osas on valdavad peeneteralised setted, lõunapoolses aga ülipeeneteralised ehk aleuriitsed liivad. Ainukese erandina on sügavaima puurangu PA-60 põhjas ülipeeneteraliste kihtide all väga peeneteralise liiva kiht. Ka on jälgitav sama värvitooniga liivakihtide esinemine erinevates läbilõigetes.

Soodla puhul on tegemist Kuusalust algava sanduri distaalse osaga. Põhja-lõunasuunas on märgata sandurtasandikule iseloomuliku kallakust aga ka setete muutumist peeneteralisemaks.

Kuna uuringuala asub sanduri distaalses osas ehk liustikuservast kaugemal kui Kuusalu ala, siis on see OSL vanusemääranguks veelgi sobivam, sest sette transport on olnud pikem ning settel on olnud suurem võimalus olla valgusele avatud. OSL vanusemäärangul sanduri distaalses, aleuriitsete liivadega osas võib tekkida oht, et jääsulamisvesi, milles kvartsi osakesi transporditi sisaldas liiga palju aleuriiti. Kõrge aleuriidi sisaldus muudab vee sogaseks, mis aga takistaks potentsiaalsel päevavalgusel setteni jõudmast (Raukas & Stankowski 2005). Seega ei sõltu vanusemäärang ainult transpordi tee pikkusest vaid ka tingimustest, mis valitsesid sete liikumisel ning settimisel.

6. Järeldused

Antud uurimustöö põhilised järeldused on järgmised:

1. Varasemate uurimisandmete ja LIDAR andmetele toetudes kirjeldati Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndites kolme glatsiofluviaalset deltat, ühte fluviomõhna, marginaalset oosi ning sandurit. Keedika uuringuala pinnavormi genees on ebaselge, kuid toetudes olemasolevatele andmetel võib seda pidada glatsiofluviaalseks deltaks.
2. Uuritavatest objektidest oleks OSL dateeringuteks kõige sobivamaks sanduri distaalne osa Kuusalu ja Soodla vahel, sest väikese voolukiirusega madalaveelises keskkonnas ning pika transpordi ajaga on suurem võimalus, et sete on saanud piisavalt valgust elektronlõksude nullimiseks.
3. Dateerimiseks sobivad hästi ka glatsiofluviaalseid deltad Tudulinna, Kellaveres, Vahelaanes ja Palivere marginaalne oos.
4. Kõik pinnavormid tekkisid viimase Weichseli jäätumise taandumisel v.a. Kellavere voor, mis suure tõenäosusega tekkis juba Kesk-Weichselis ja on oma radiaalse kuju omandanud hilisema liustiku liikumisel üle glatsiofluviaalsete setete.
5. Dateerimisel võib probleeme tekkida pinnavormide ja setetega, mis on tekkinud liiga sügavas või mudases vees, settinud liustiku vahetuslähedusse või irdjäापangaste vahele. Lisaks ei sobi OSL meetodil vanusemääramiseks kruusased setted, eriti veeriseid sisaldav kruus ja võimalusel tuleb eelistada peen- või keskmiseteralist liiva.
6. Liiva ja kruusakarjäärade varasemate uuringute aruannete andmete kvaliteet on erinev ning need ei pruugi sobida detailseteks geoloogilis-geomorfoloogilisteks iseloomustusteks ning kindlasti on vaja ka ise välitöid läbi viia. Morfoloogia iseloomustamiseks on suureks abiks detailsed LIDAR andmed.
7. Nii Pandivere kui ka Palivere staadiumide vanuse andmed on vastuolulised, mistõttu on vajadus rohkemateks dateeringuteks.

7. Kokkuvõte

Bakalaureusetöö raames uuriti Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndis paiknevaid glatsiofluviaalseid pinnavorme ja neid moodustuvaid setteid. Töö eesmärgiks oli nende pinnavormide geoloogiline ja morfoloogiline kirjeldamine, andmaks hinnanguid nende sobivusele OSL meetodil dateeringuks ning hinnata ka varasemaid dateeringuid.

Eesti ala vabanes viimase Skandinaavia mandriliustiku alt ajavahemikul 14 700–12 700 a.t (Kalm et al. 2011). Liustiku taandumine ei olnud ühtlane, vaid esinesid erineva pikkusega liustikuserva seisakud, mida tähistavad viis servamoodustiste vööndit (Haanja, Otepää, Sakala, Pandivere, Palivere). Staadiumide vanuse andmed on vastuolulised, ulatudes Palivere puhul 11 200 a (Raukas 1977) kuni 13 600 (Kalm et al. 2011) ning u 14 700 aastani (Raukas 1992), mistõttu on vajadus täiendavateks uuringuteks.

Töö käigus kirjeldati kaheksat uuringuala: Aegviidu, Kellavere, Vahelaane, Tudulinna uuringualasid Pandivere servamoodustiste vööndist ning Jaakna, Keedika, Kuusalu ja Soodla uuringualasid Palivere servamoodustiste vööndist. Uuringualade kirjeldamiseks kasutati varasemate uuringute aruanded Eesti Geoloogia Fondist ja LIDAR andmeid Maa-ametist. Karjäärade aruannetest valiti puuraugud ning profiilid, mis võimaldaks saada pinnavormi ehitusest kõige parema ülevaate. Valitud puuraukude kirjelduste põhjal joonistati läbilõiked, millele tugineti valitud pinnavormide geoloogiat ja setete analüüsil. Pinnavormide morfoloogia kirjeldamiseks teostati reljeefanalüüs tuginedes LIDAR andmetele.

Geoloogilise ja morfoloogilise analüüsi käigus kirjeldati Pandivere ja Palivere servamoodustiste vööndites kolme glatsiofluviaalset deltat, üht sandurit, fluviomõhna ning marginaalset oosi. Ühe pinnavormi geneesi ei suudetud kindlaks teha piisavate andmete puudumisel varasematest uuringutest, kuid ilmselt on tegemist glatsiofluviaalse deltaga. OSL dateeringuteks sobivad eelkõige sandurid ning glatsiofluviaalseid deltaga, sest nende settimiskeskkond on vahetult liustikuserva ees ning sette transport piisavalt pikk kvartsi ja K-päevakivi kristallstruktuuris olevate lõksude nullimiseks päevavalguses. Dateering võib ebaõnnestuda sette puhul, mida on transporditud liiga sügavas või mudases vees või setted, mis on settinud vahetult liustiku serva ette.

8. Summary

The morphology and geology of glaciofluvial landforms in the ice-marginal zones of Pandivere and Palivere, northern Estonia.

Current thesis describes the geological and morphological settings of glaciofluvial landforms in the ice-marginal zones of Pandivere and Palivere, North Estonia. This study is a part of a research project between Stockholm University and University of Tartu. The aim of this project is to determine the age of ice-marginal zones by using Optically Stimulated Luminescence (OSL) method. The main goals of current thesis is to describe the properties of landforms in eight different locations (1), give an evaluation on whether or not these landforms and deposits are suitable for OSL dating (2) and give an overview of previous age determination of these ice-marginal zones (3).

The deglaciation of the last Scandinavian Ice sheet (SIS) in Estonia took place between 14 700-12 700 BP. The deglaciation was not homogeneous and therefore five ice-marginal zones from south to north can be identified: Haanja, Otepää, Sakala, Pandivere and Palivere. The age estimations of those ice-marginal zones are mostly made based on varved clays, ^{14}C , ^{10}Be and OSL dating methods. There are a lot of controversial age estimations and therefore there is a need for more dating different deposits and landforms using new dating methods. The reason for this thesis is a need for an evaluation of landform and deposits that are sampled for OSL dating in order to describe and assess the conditions in which those sediments were deposited.

Reports of previous quarry surveys was used to describe the given landforms in Aegviidu, Kellavere, Vahelaane, Tudulinna, Jaakna, Keedika, Kuusalu and Soodla. Based on the descriptions cross sections were drawn and interpreted. Light Detection And Ranging or LIDAR data from Estonian Land Board was used for morphological interpretation. As a result three glaciofluvial deltas were described along with a sandur, marginal esker and a kame. One landform in the Keedika location could not be properly identified due to the lack of information in the quarry report. It was concluded that sandur deposits between Kuusalu and Soodla are most likely to yield a credible age estimation, so as glaciofluvial deltas in Tudulinna, Vahelaane, Kellavere and Palivere. Biggest errors in age estimation can be cause by a deep water transport, sediment transport in a muddy water or deposition close to the ice margin. In all of those cases sediments might not have enough sunlight bleaching before they are deposited and therefore the age can be overestimated.

Tänuavaldused

Tänan oma uurimistöö juhendajaid Tiit Hangu ja Katrin Kallat kannatliku meele ja asjalike nõuannete eest. Samuti tänan oma perekonda ning sõpru toetuse ning mõistva suhtumise eest.

(Maria Laidla)

Kasutatud kirjandus

- Arold, I. 2005. Eesti Maastikud. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu, 453 lk.
- Benn, D. I., Evans, D. J. A. 2005. Glaciers and Glaciation. Hodden Education, London, 816 lk.
- Bennett, M. R., Glasser, N. F. 2003. Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms. Wiley and Sons, New York, 364 lk.
- Carrivick, J. L., Russel, A. J. 2007. Glacifluvial Landforms of Deposition. Kogumikus: Elias, S. A. (toim.), Encyclopedia of Quaternary Science, Vol 1. Elsevier, lk 909-920.
- Hang, T. 2003. A local clay-varve chronology and proglacial sedimentary environment in glacial Lake Peipsi, eastern Estonia. Boreas, Vol 32. Wiley-Blackwell, Oslo, lk 416-426.
- Kajak, K.(koost.). 1999. Eesti Kvaternaarisetted. Seletuskiri. Karukäpp, R., Rattas, M., Raukas, A. (toim.). Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 34 lk.
- Kalm, V., 2006. Pleistocene chronostratigraphy in Estonia, southeastern sector of the Scandinavian glaciation. Quaternary Science Reviews 25, 960-975.
- Kalm, V., Gorlach, A. 2013. Impact of bedrock surface topography on spatial distribution of Quaternary sediments and on the flow pattern of late Weichselian glaciers on the East european Craton (Russian Plain). Geomorphology, Vol 207. Elsevier, Amsterdam, lk 1-9.
- Kalm, V., Gorlach, A., Lasberg, K., Kalla, K. 2011a. Viimase Skandinaavia jäätumise dünaamika Läänemerest kagus. Raamatus: Parmasto, E., Laisk, A., Kaljo, D. (vastutavad toim.), Help, H.-L., Jakobson, S., Rebo, Ü., Varlamova, G. (toim.). Teadusmõte Eestis. Elu- ja maateadused. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, lk 161-167.
- Kalm, V., Raukas, A., Rattas, M., Lasberg, K. 2011b. Pleistocene Glaciations in Estonia. Kogumikus: Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D. (toim.). Developments in Quaternary Sciences 15, Elsevier, Amsterdam, lk 95–104.
- Karukäpp, R. 2005. Eskers in the periphery of their distribution in North Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, Vol 54. Estonian Academy Publishers, Tallinn, lk 26-39.

- Karukäpp, R., Raukas, A. 1997. Deglaciation history. Kogumikus: Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.). Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436 lk.
- Lasberg, K., Kalm, V. 2013. Chronology of Late Weichselian glaciation in the western part of the East European Plain. *Boreas*, Vol 42. Wiley-Blackwell, Oslo, lk 995-1007.
- Lowe, J. J., Walker, M. J. C. 1997. Reconstructing Quaternary Environments. Addison Wesley Longman, 446 lk.
- Rattas, M., Kalm, V. 2001. Lithostratigraphy and distribution of tills in the Saadjärve drumlin field, east-central Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, Vol 50. Estonian Academy Publishers, Tallinn, lk 24-42.
- Raukas, A. 1977. Ice-marginal formations and the main regularities of the deglaciation in Estonia. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* 27, lk 68–78.
- Raukas, A. 1992. Ice marginal formations of the Palivere zone in the eastern Baltic. *Sveriges Geologiska Undersökning* 81, lk 277–284.
- Raukas, A. 2009. When and how did the continental ice retreat from Estonia? *Quaternary International*, Vol 207. Elsevier, Oxford, lk 50-57.
- Raukas, A., Kajak, K. 1997a. Classification and composition of deposits. Kogumikus: Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.). Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436 lk.
- Raukas, A., Kajak, K. 1997b. Ice ages. Kogumikus: Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.). Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436 lk.
- Raukas, A., Kalm, V., Karukäpp, R., Rattas, M. 2004. Pleistocene glaciations in Estonia. Kogumikus: Ehlers, J., Gibbard, P.L. (toim.). *Developments in Quaternary Sciences*, 2, Elsevier, Amsterdam, lk 83–91.
- Raukas, A., Rõuk, A. M. 1995. Pinnamood ja selle kujunemine. Raamatus: Raukas, A. (koost.). *Eesti loodus. Eesti Entsüklopeediakirjastus*, Tallinn, lk 120-175.
- Raukas, A., Stankowski, W. 2005. Influence of sedimentological composition on OSL dating of glaciofluvial deposits: examples from Estonia. *Geological Quarterly*, Vol 49. Warszawa, lk 463-470.

Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L., Kalm, V. 2009. Development of the Baltic ice lake in the eastern Baltic. *Quaternary International*, Vol 206. Elsevier, Oxford, lk 16-23.

Saarse, L., Heinsalu, A., Veski, S. 2012. Deglaciation chronology of the Pandivere and Palivere ice-marginal zones in Estonia. *Geological Quarterly*, Vol 56. Elsevier, lk 353-362.

Eesti Geoloogiafondi materjalid:

Einmann, A. 2006. Aruanne Ida-Virumaal Tudulinna vallas Tudulinna kruusamaardla Kopli uuringuruumis tehtud geoloogiliste tööde aruanne (varu seisuga 01.03.2006). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7775.

Einmann, A. 2007a. Kuusalu liivamaardla ploki nr 6 Kuusalu IV uuringuruumis tehtud geoloogiliste tööde kohta (varu seisuga 01.03.2007). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7843.

Einmann, A. 2007b. Aruanne Harjumaal Anija vallas Soodla liivamaardla Soodla uuringuruumis tehtud geoloogiliste tööde kohta (varu seisuga 01.06.2006). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7868.

Einmann, A., Aigro, M. 2009. Aruanne Harjumaa Vahelaane kruusamaardla Vahelaane II, Vahelaane III, Vahelaane IV uuringuruumides tehtud geoloogiliste tööde kohta (varu seisuga 01.09.2009). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 8180.

Killing, M., Kotenjov, R., Kattai, V. 2008. Harju maakonna Vahelaane kruusamaardla Vahelaane V uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.01.2008). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7972.

Kotenjov, R., Kattai, V. 2006. Soodla liivamaardla Soodla II uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.01.2006). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7753.

Kukk, M. 2009. Aruanne Tudulinna kruusamaardla Tudulinna kruusakarjääris tehtud geoloogiliste tööde kohta (varu seisuga 01.06.2009.a). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 8117.

Peikre, R. 1992. Aruanne Jaakna kruusliivamaardla eel-ja detailuuringust Läänemaal (varu arvutus seisuga 01.01.92). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 4579.

Rammo, M. 2010. Kuusemetsa II uuringuruumi liiva ja kruusa varu geoloogiline uuring (varu seisuga 31.09.2010). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 8259.

- Rammo, M., Karimov, M. 2010. Moora uuringuruumi liiva ja kruusa varu geoloogiline uuring (varu seisuga 01.07.2010.a.). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 8239.
- Rändur, M. 2005. Lääne maakonna Keedika kruusamaardla, sh Keedika kruusakarjääri mäeeraldise jääkvaru hinnang (varu seisuga 01.03.2005.a.). Tallinn. Eesti Geoloogiafond 7651.
- Thrasher, I. M., Mauz, B., Chiverrell, R. C., Lang, A. 2009. Luminescence dating of glaciofluvial deposits: A review. *Earth-Science Reviews*, Vol 97. Elsevier, lk 133-146.
- Toom, A. 1992. Lõuniku karjäär. Geoloogilised uurimistööd karjääri jääkvarude määramiseks. Tallinn. Eesti Geoloogiafond 4668.
- Viru, J. 1994. Laekvere valla Kuusemetsa kruusliiva karjääri jääkvaru arvutus seisuga 01.01.1994.a. Laekvere vald. Eesti Geoloogiafond 4791.
- Wallinga, J. 2002. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits : a review. *Boreas*, Vol. 31. , Oslo, lk 303–322.

Internet:

Maa-ameti veebileht (vaadatud: 21.04.2014):

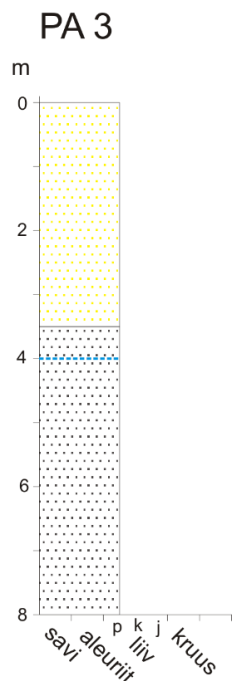
<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed-pl14.html>

Lisad:

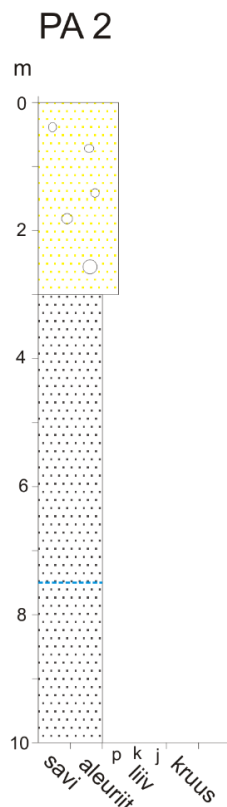
Lisa 1	46
Lisa 2	48
Lisa 3	51
Lisa 4	53
Lisa 5	57
Lisa 6	59
Lisa 7	61
Lisa 8	62

Lisa 1. Aegviidu profilide puuraukude läbilõiked koos kirjeldustega (Toom 1992).

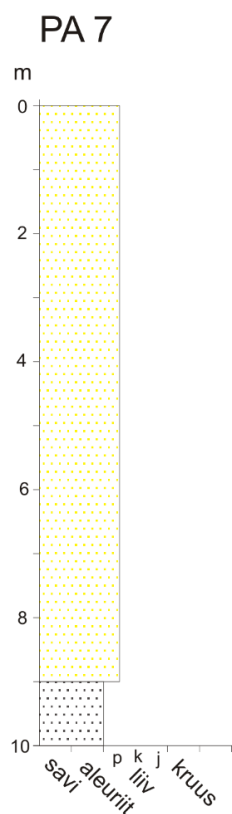
Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.



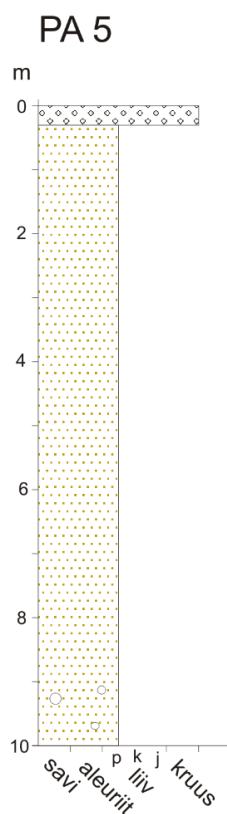
0,0-3,5m peeneteraline liiv
3,5-8,0+m peeneteraline
liiv, tihe



0,0-3,0m peeneteraline liiv
üksikute kruusateradega
3,0-10,0+m tolmane liiv,
tihe

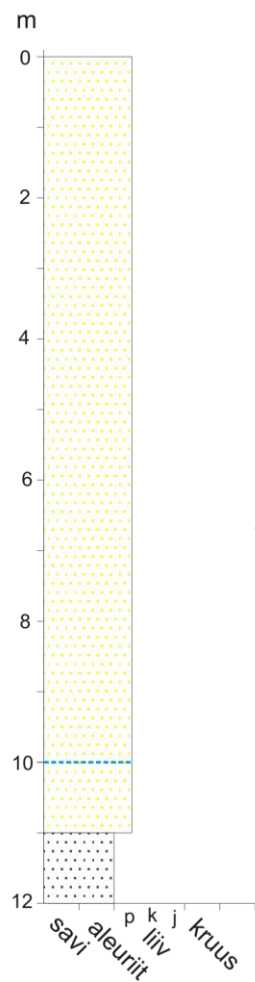


0,0-9,0m peeneteraline liiv
9,0-10,0+m tolmane liiv,
tihe



0,0-0,3m kruusapinnas
0,3-10,0+m peeneteraline
liiv, tihe; alates 9,0 m
üksikute kruusateradega

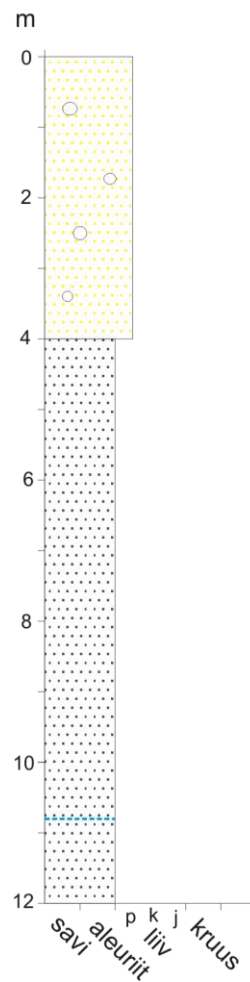
PA 9



0,0-11,0m peeneteraline
liiv

11,0-12,0+m tolmane liiv,
tihe

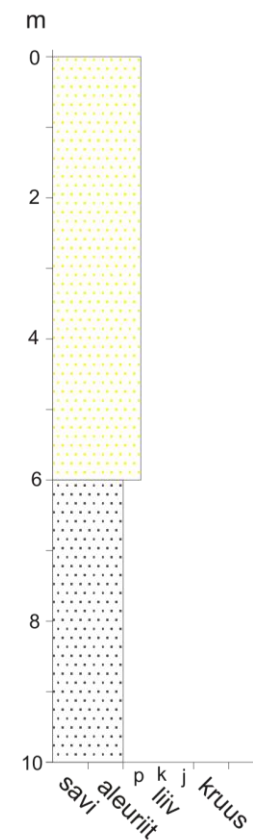
PA 12



0,0-4,0m peeneteraline
liiv
üksikute kruusateradega

4,0-12,0+m tolmane liiv,
tihe

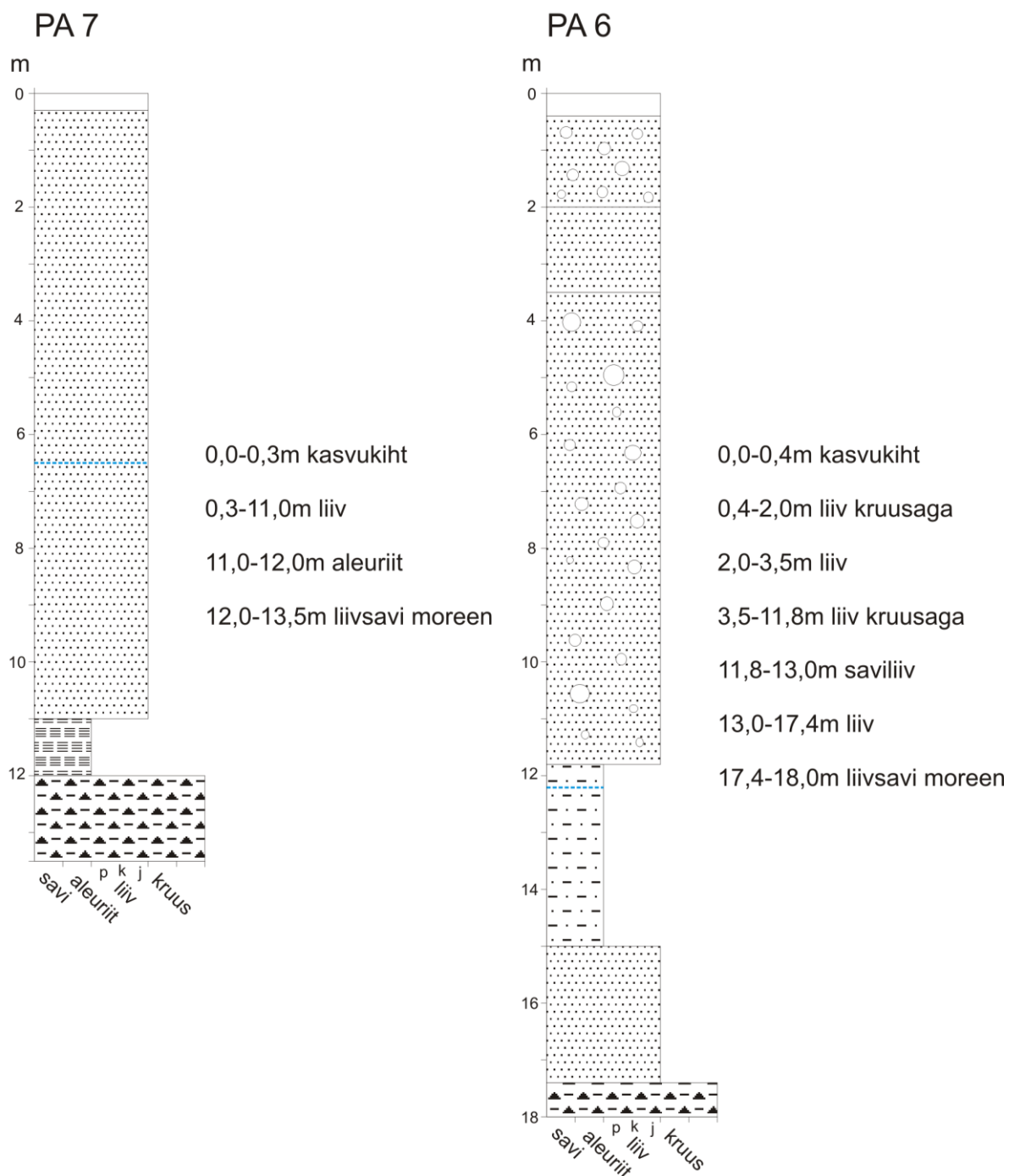
PA 13

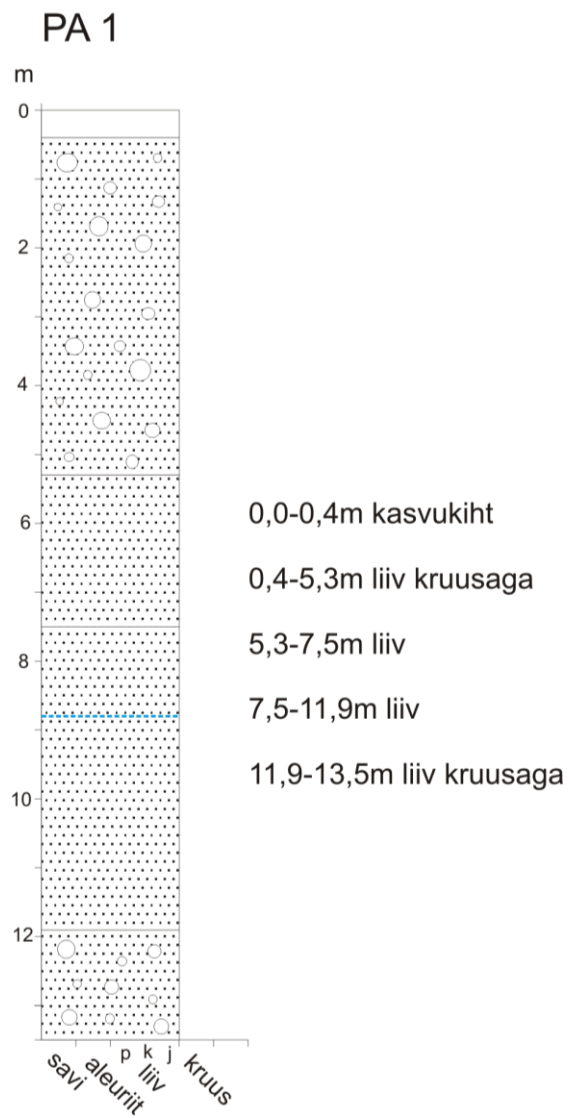
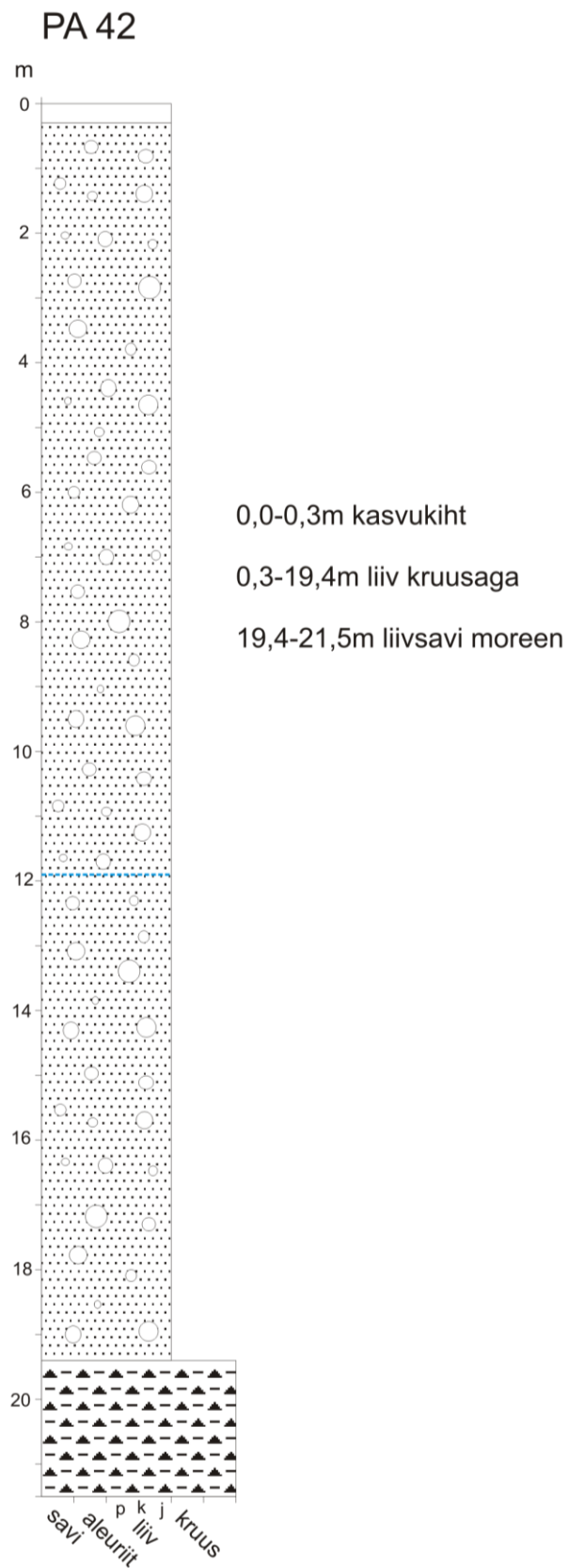


0,0-6,0m peeneteraline
liiv

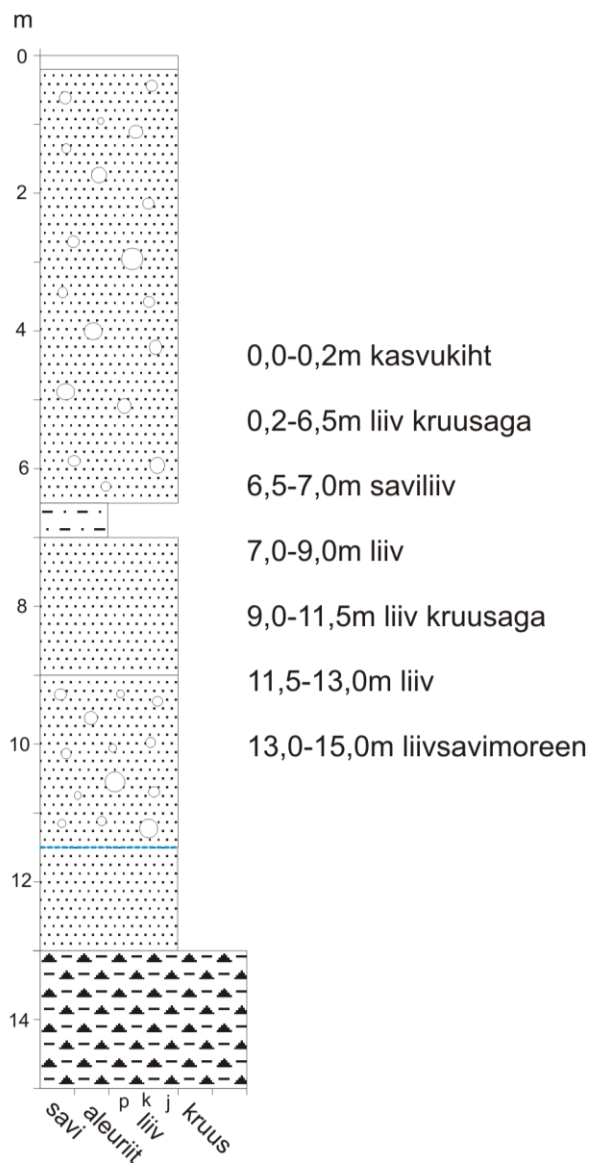
6,0-10,0+m tolmane liiv,
tihe

**Lisa 2. Jaakna profiili puuraukude läbilõiked koos kirjeldustega (Peikre 1992).
Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.**

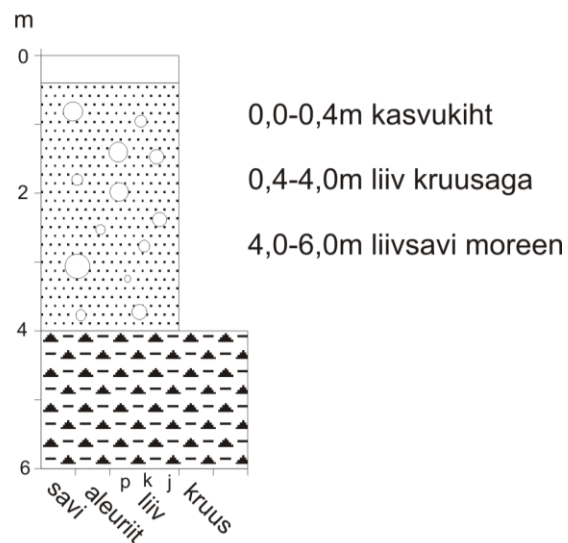




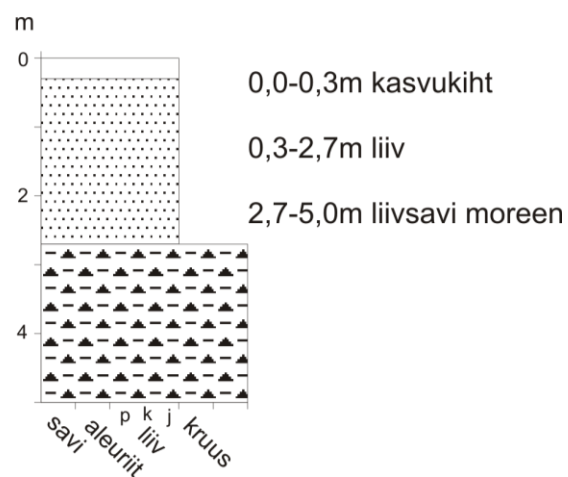
PA 45



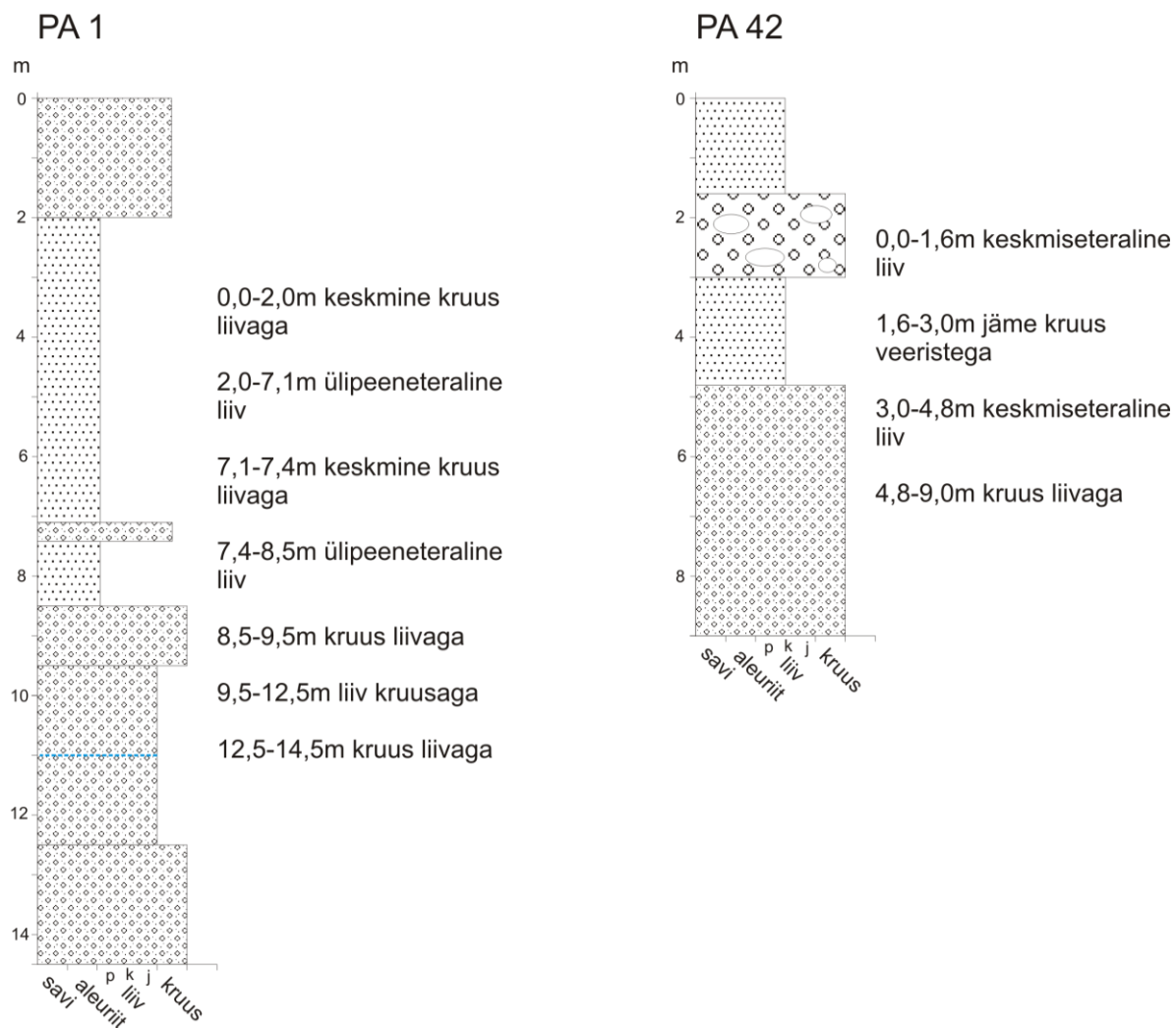
PA 2



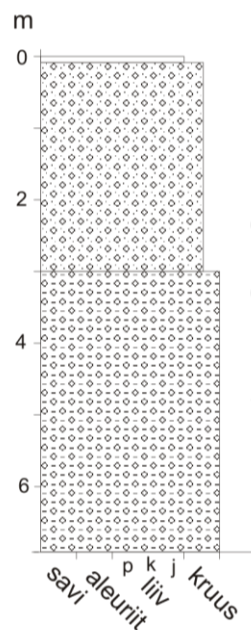
PA 48



Lisa 3. Keedika profiili puuraukude läbilõigete kirjeldused (Rändur 2005). Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.



PA 11

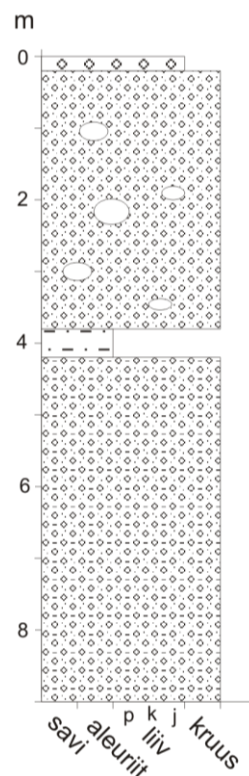


0,0-0,1m kasvukiht

0,1-3,0m keskmine kruus
liivaga

3,0-6,9m savikas kruus

PA 32



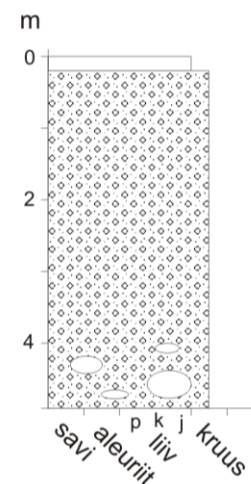
0,0-0,2m kasvukiht
kruusaga

0,2-3,8m kruus liiva ja
veeristega

3,8-4,2m saviliiv

4,2-9,0m kruus liivaga,
savikas

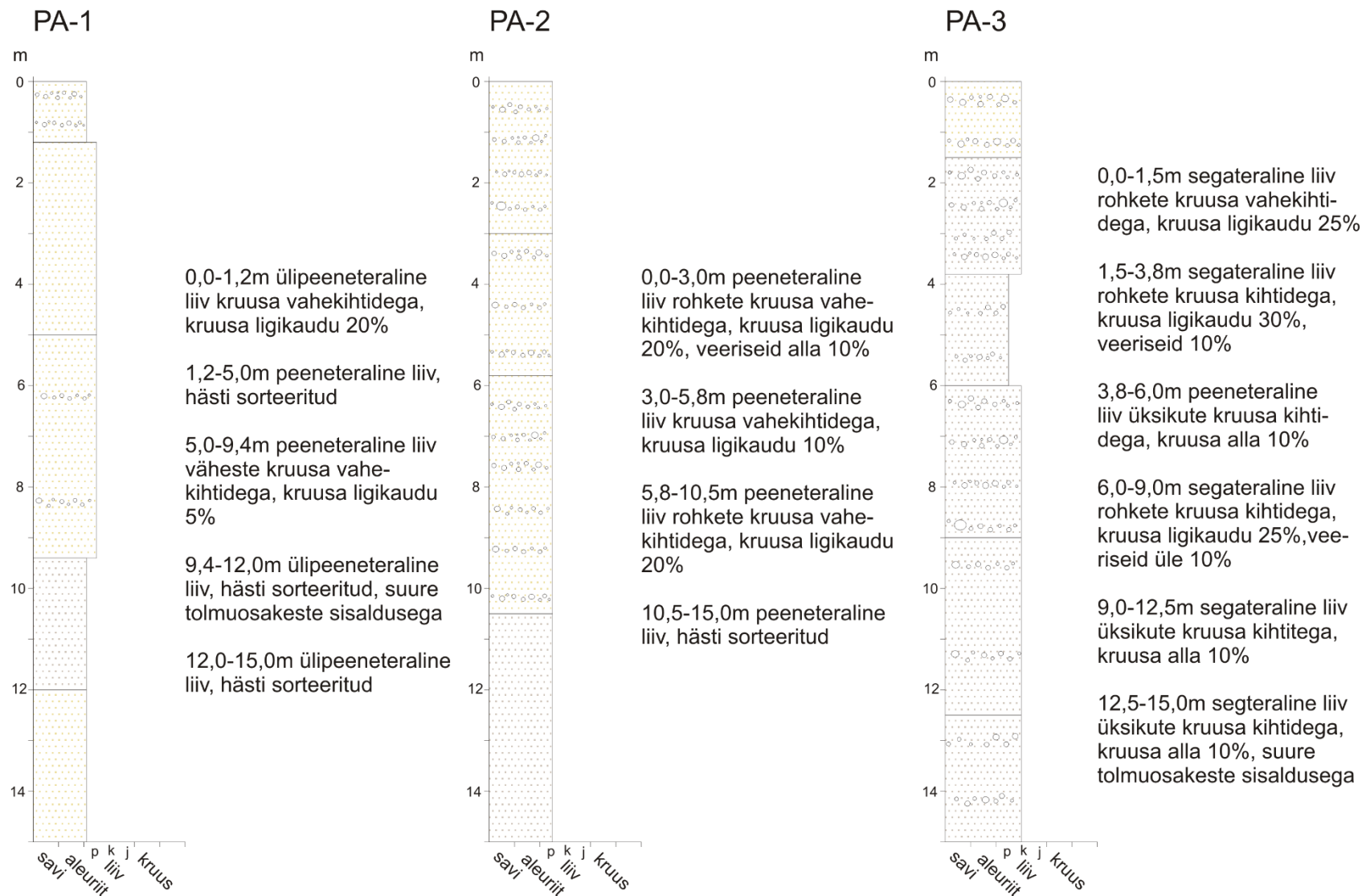
PA 9

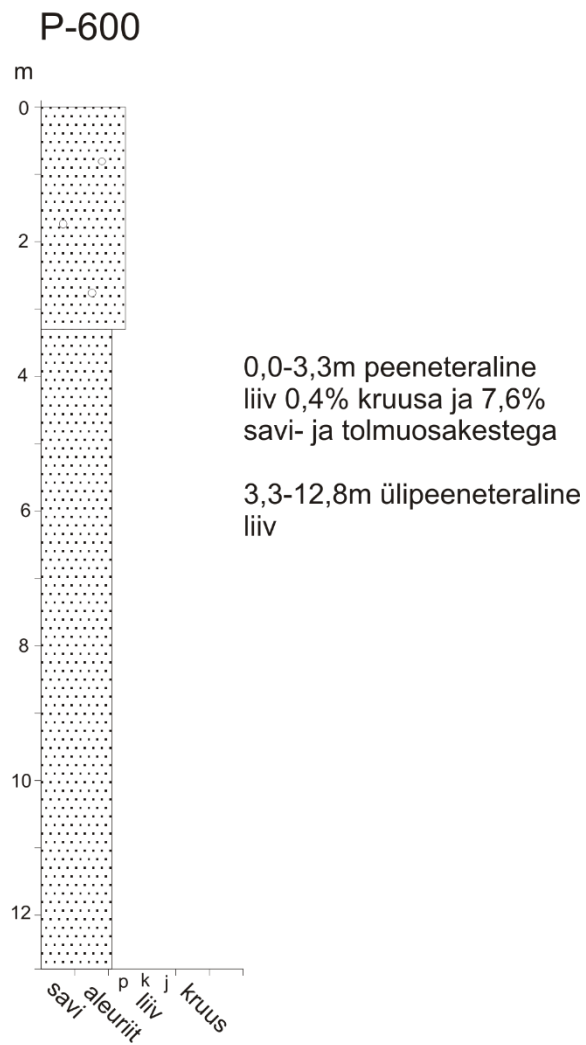
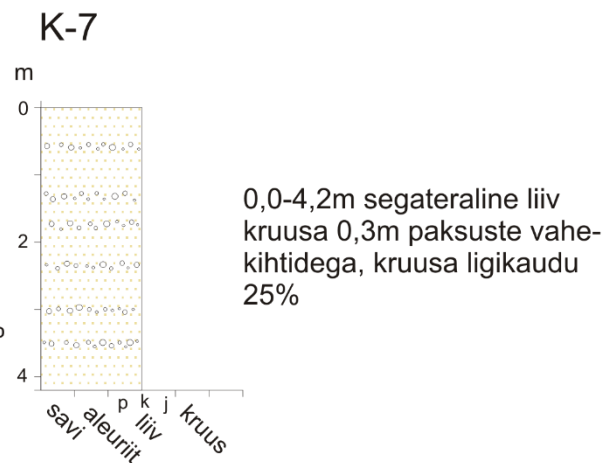
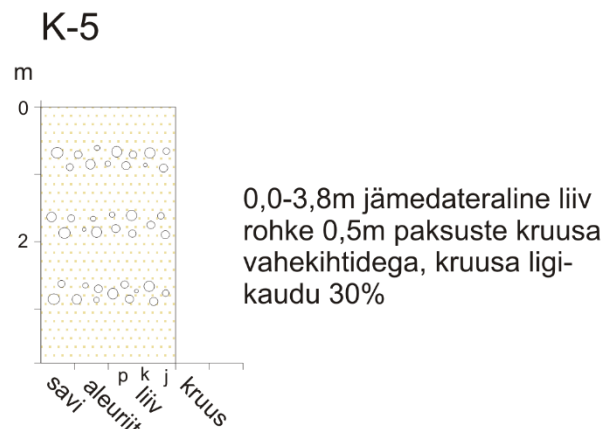
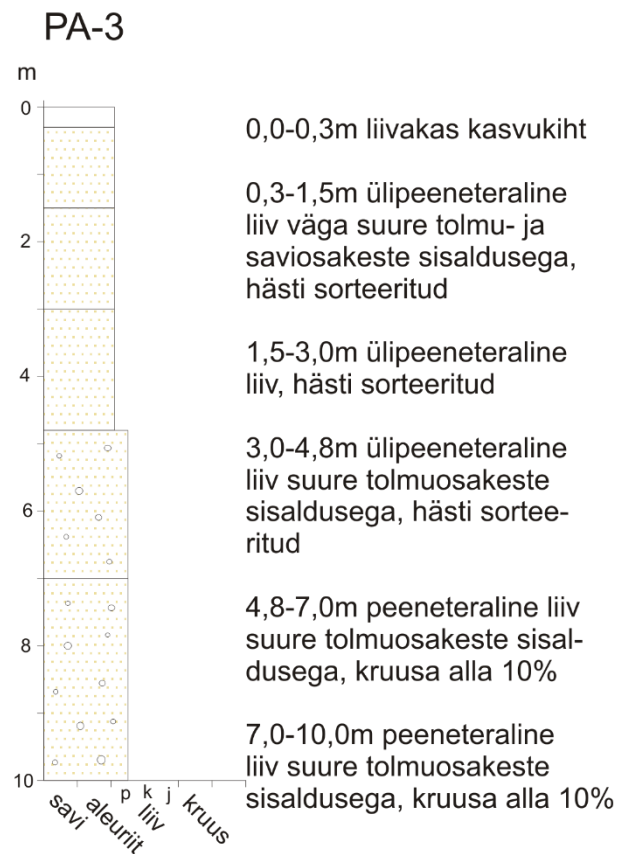


0,0-0,2m kasvukiht

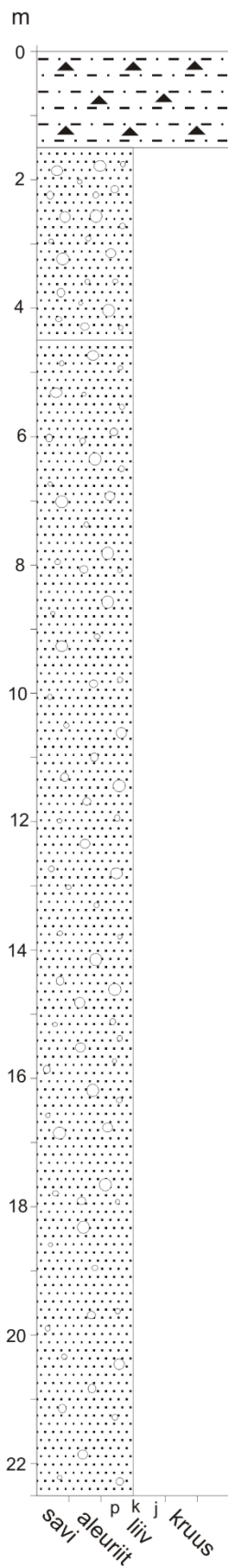
0,2-4,8m keskmine kruus
liivaga, lõpus on veerised

Lisa 4. Kellavere profiilide puuraukude läbilõigete kirjeldused (Viru 1994; Rammo 2010; Rammo & Karimov 2010). Kasutatud leppemärgid on lk 63.

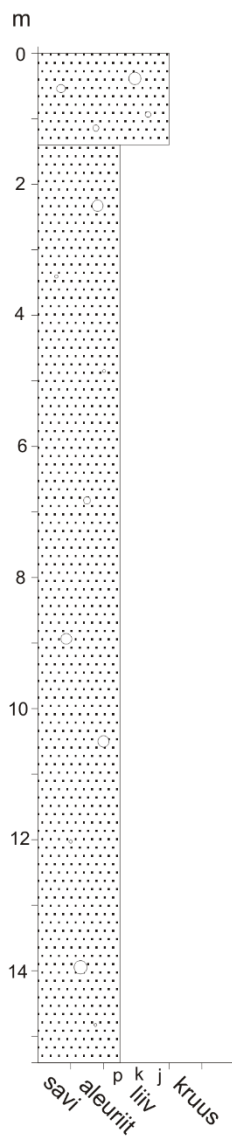




P-84



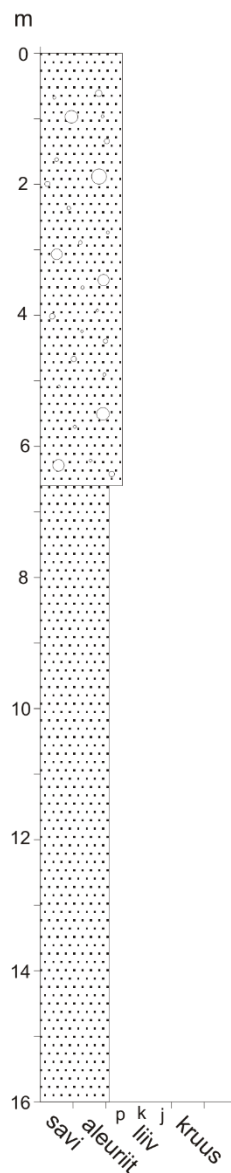
P-85



0,0-1,4m jämädateraline
liiv 21,8% kruusa ja 5,8%
savi- ja tolmuosakestega

1,4-16,7m peeneteraline liiv
4% kruusa ja 6,6% savi- ja
tolmuosakestega, allpool
kruusa 4,1%

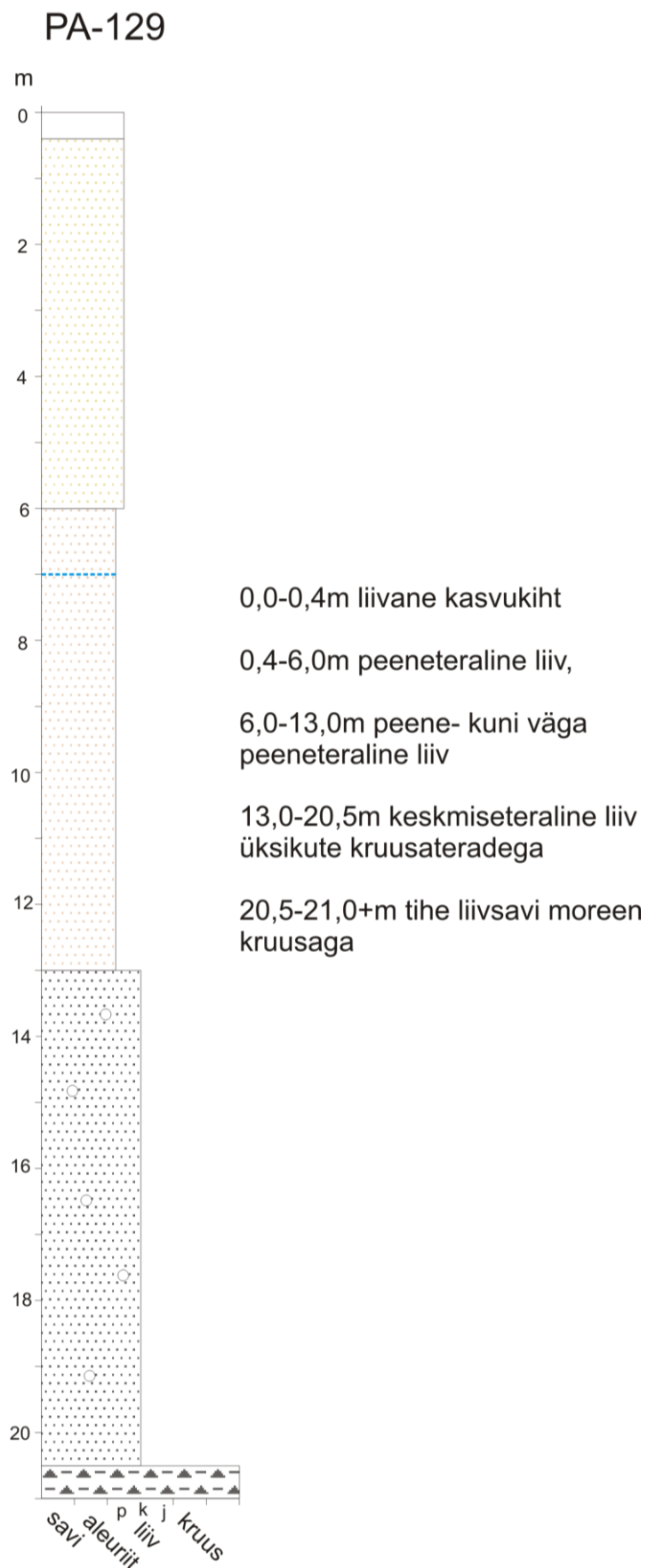
P-576



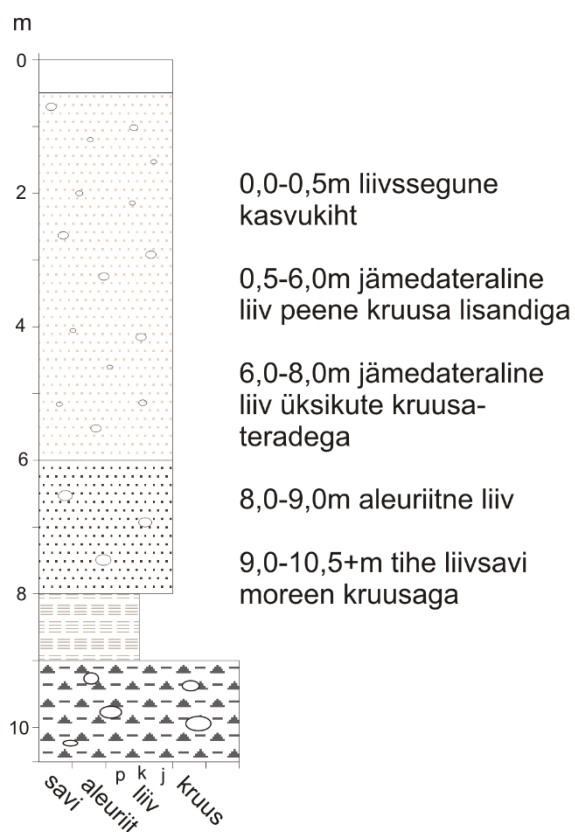
0,0-6,6m peeneteraline liiv
üksikute kruusa ja veeristega

6,6-16,6m ülipreeneteraline
liiv

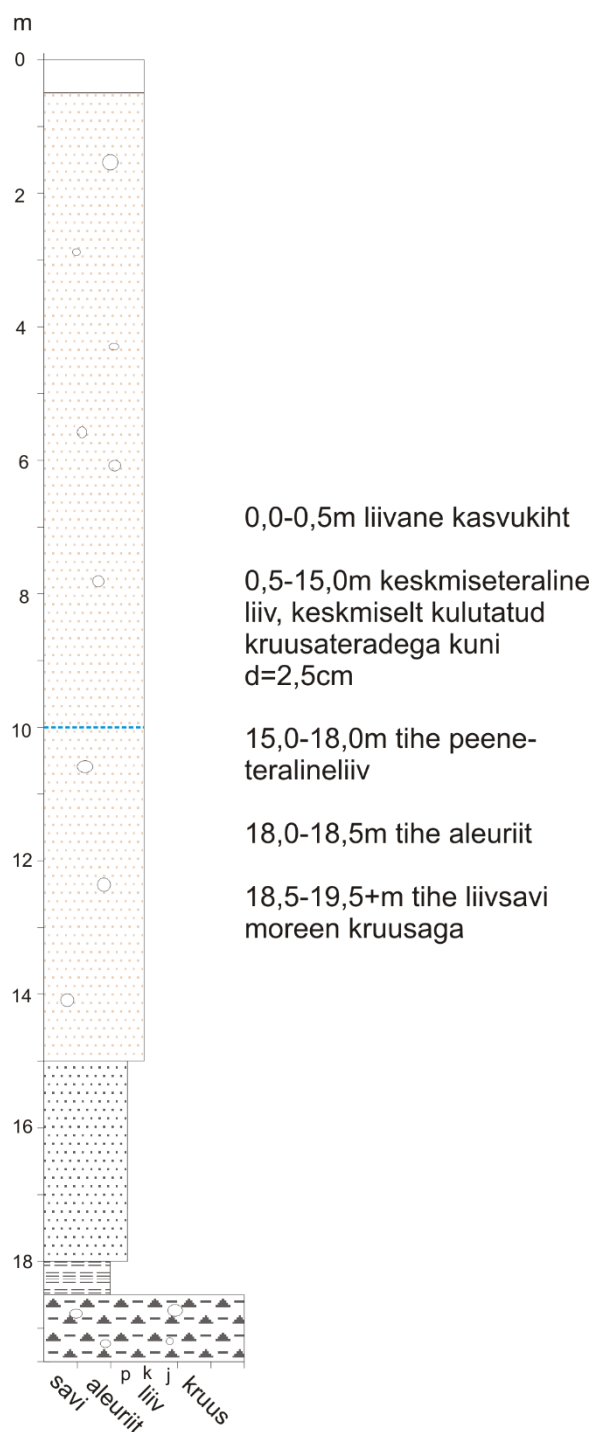
Lisa 5. Kuusalu profiili puuraukude läbilõigete kirjeldused (Einmann 2007a). Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.



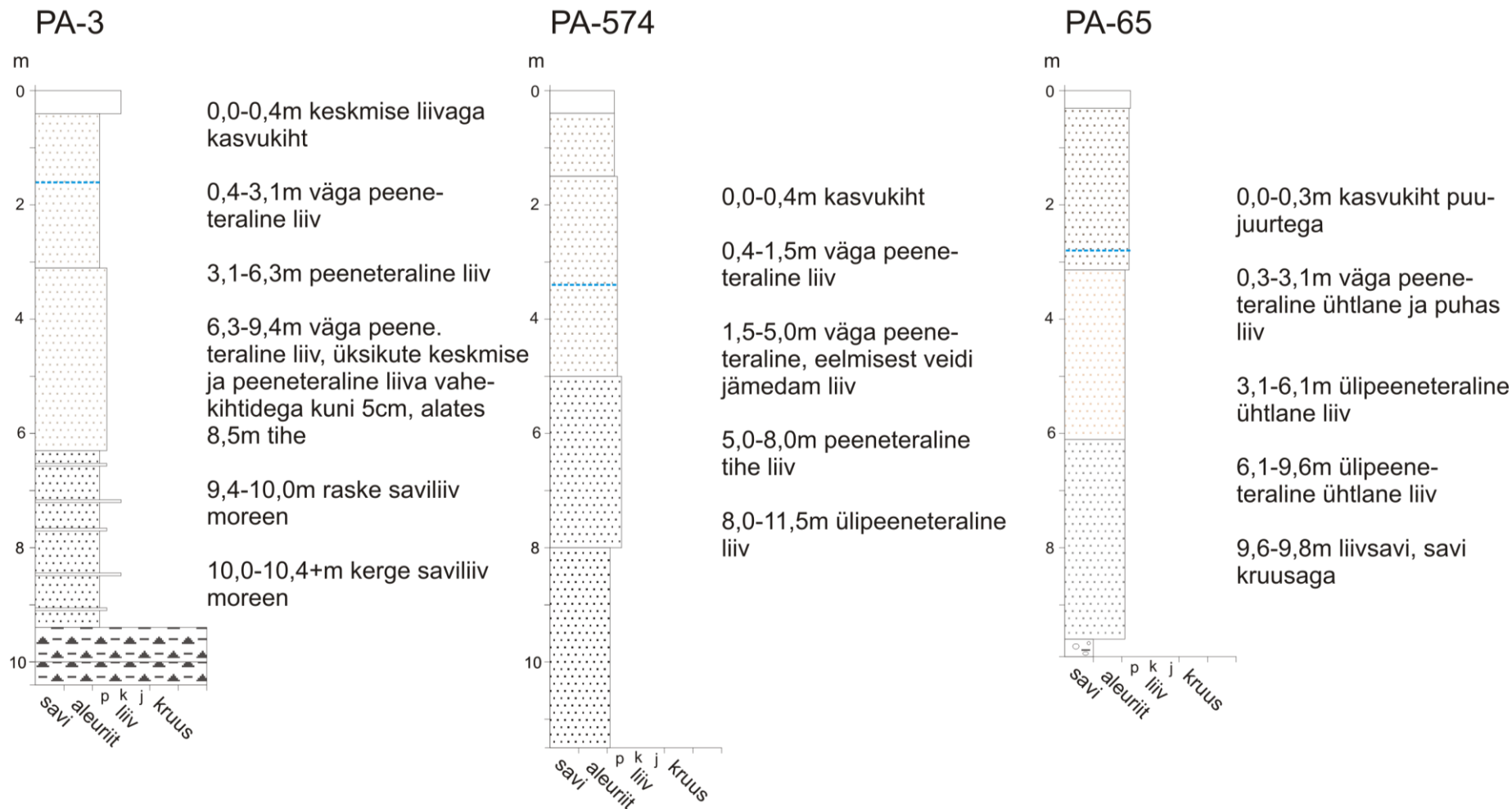
PA-131



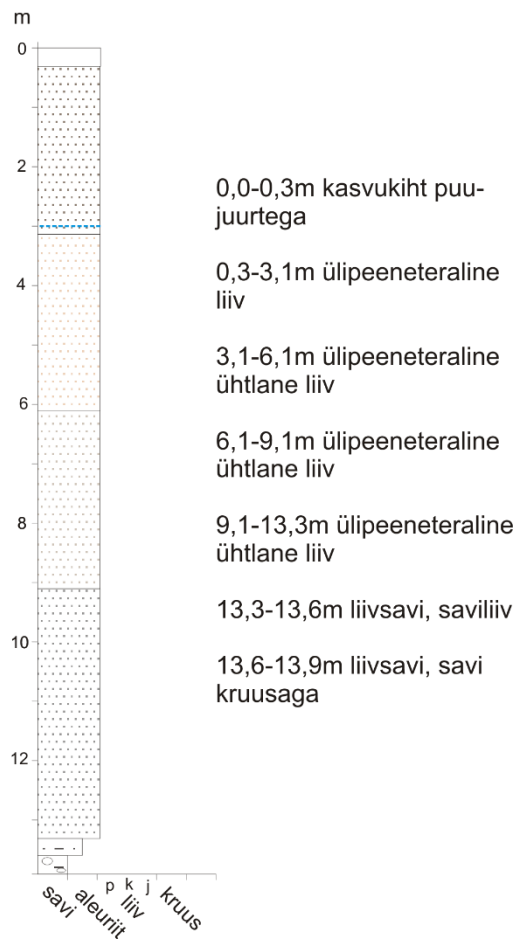
PA-130



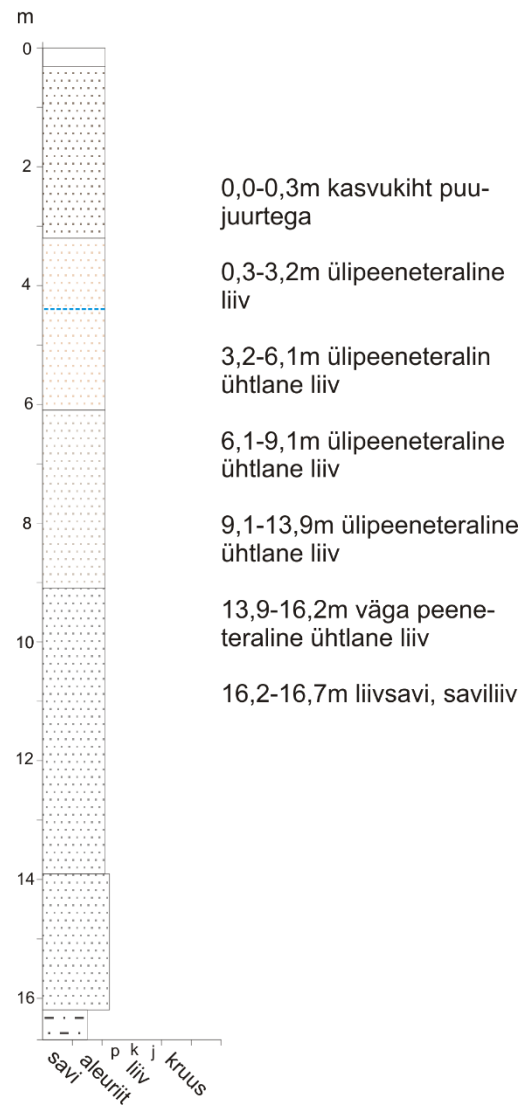
Lisa 6. Soodla profiili puuraukude läbilõigete kirjeldused (Kotenjov & Kattai 2006; Einmann 2007a). Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.



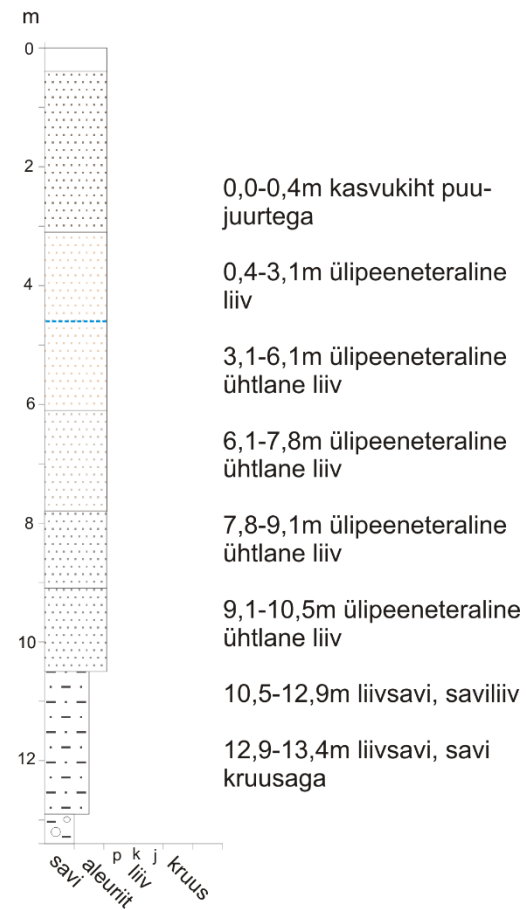
PA-62



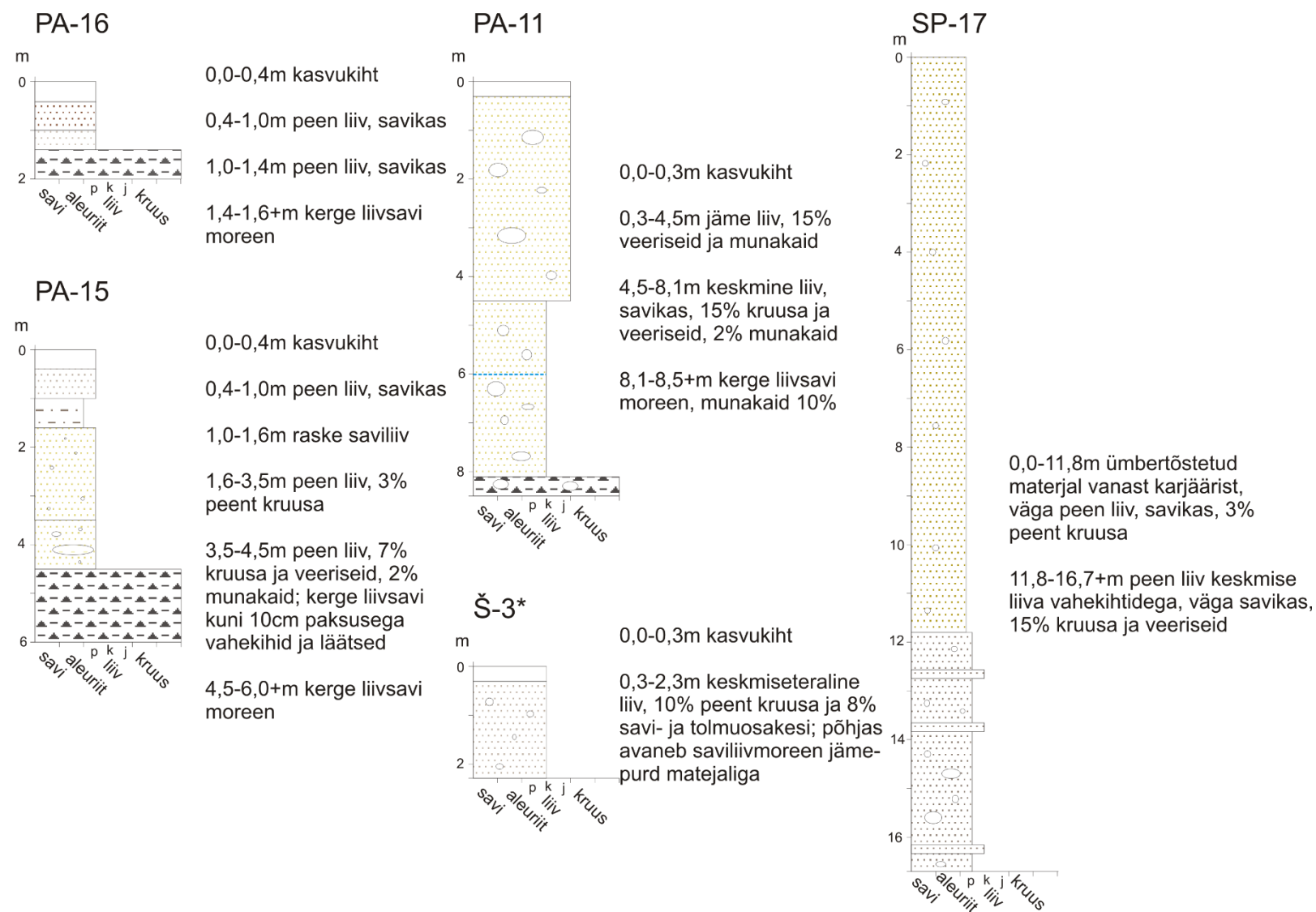
PA-60



PA-59

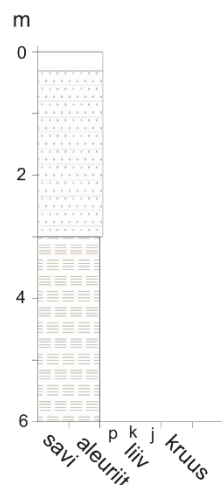


Lisa 7. Tudulinna profiili puuraukude läbilõigete kirjeldused (Einmann 2006; Kukk 2009). Kasutatud leppemärgid asuvad lk 63.



Lisa 8. Vahelaane profiili puuraukude läbilõigete kirjeldused (Killing jt. 2008; Einmann & Aigro 2009). Kasutatud leppemärgid on toodud lk 63.

Š-12

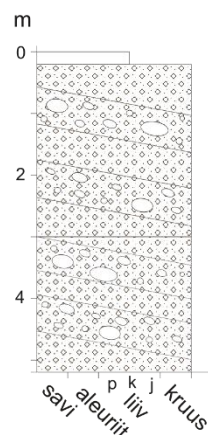


0,0-0,3m kasvukiht

0,3-3,0m ülipeeneteraline liiv horisontaalkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,2-0,6 cm

3,0-6,0+m aleuriit

SPŠ-33

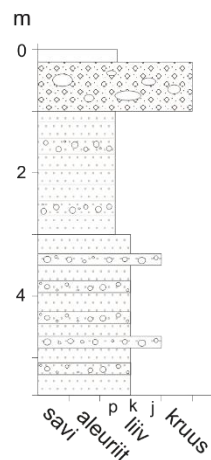


0,0-0,2m kasvukiht kruusa ja veeristega

0,2-3,0m kruus keskmiseteralise sorteerimata täiteliivaga; jälgitav 5° nurga all itta kaldkihilisuus munakatest, veeristest ja kruusateradest koosnevate 30-60 cm kihtidena; kruus, veerised ja munakad on hästi kulutatud, isomeetriselised ja venitatud kujuga

3,0-5,2+m kruus jämedateralise sorteerimata täiteliivaga; jälgitav 5° nurga all kaldkihilisuus itta, 30-60 cm paksused kihid veeristest, munakatest ja kruusateradest, mis on hästi kulutatud, isomeetriselised ja venitatud kujuga

Š-38



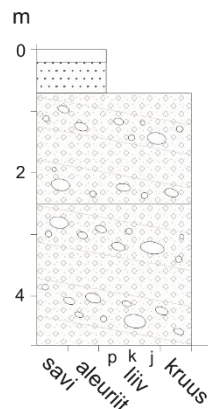
0,0-0,2m kasvukiht kruusa ja veeristega

0,2-1,0m kruus peeneteralise täiteliivaga; liiv on savikas ja sorteerimata; kruus, veerised ja munakad on keskmiselt, vähem hästi kulutatud, isomeetriselised, venitatud ja lapiku kujuga; intervall on kihistamata

1,0-3,0m peeneteraline liiv horisontaalkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 1-3 cm; peenkruusa sisaldavad vahekihid 5-30 cm paksused

3,0-5,6+m keskmiseteraline liiv kihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,7-1,5 cm, kruusa sisaldavate keskmise- kuni jämedateralise liiva 3-8 cm vahekihtidega

SPŠ-34



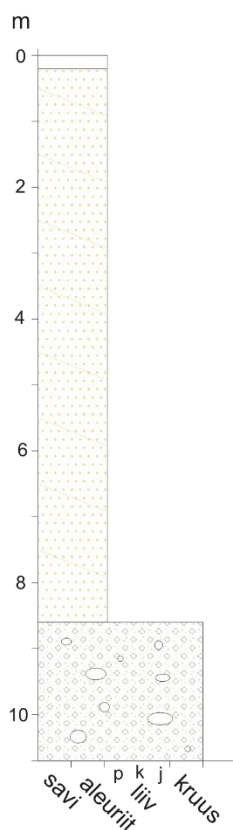
0,0-0,2m kasvukiht kruusa ja veeristega

0,2-0,7m väga peeneteraline kihistamata liiv

0,7-2,5m kruus peeneteralise täiteliivaga, mis on veidi savikas; kruus, veerised ja munakad on võrdse hulga halvasti, keskmiselt ja hästi kulutatud, isomeetriselised ja lapiku, vähem venitatud kujuga; lapikutel veeristel ja munakatel on ida suunas nõrk kaldkihilisuus

2,5-4,8+m kruus peeneteralise täiteliivaga; kruus, veerised ja munakad on võrdse hulga halvasti, keskmiselt ja hästi kulutatud, isomeetriselised ja lapiku, vähem venitatud kujuga; lapikutel veeristel ja munakatel on ida suunas nõrk kaldkihilisuus

SPŠ-4

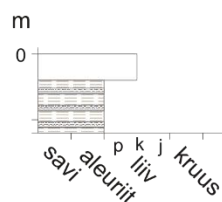


0,0-0,2m liivane kasvukiht

0,2-8,6m ülipeeneteraline liiv kaldkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,8-3,0 cm

8,6-10,7+m kruus keskmise-teralise täiteliivaga; kruus, veerised ja munakad on keskmiselt ja hästi kulutatud, lapiku ja venitatud kujuga

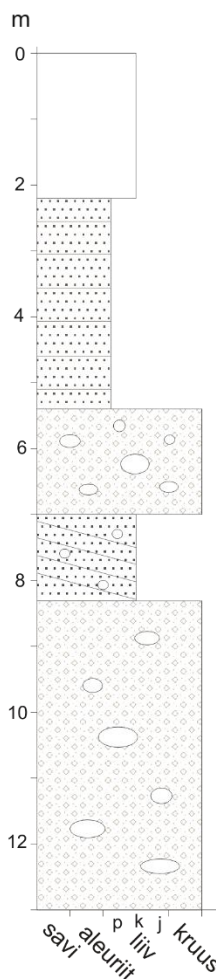
Š-29



0,0-0,4m kasvukiht

0,4-1,2+m aleuriit kerge saviliiva koostisega 3-10cm paksuste sama vahemiku tagant korduvate viirsavi kihtidega, varvid on pruuni ja halli värvusega ning 0,3-0,7 cm paksused

SPŠ-21



0,0-2,2m karjäärilalt kooritud muld

2,2-5,4m väga peeneteraline liiv horisontaalkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,2-0,8 cm

5,4-7,0m kruus keskmise-teralise täiteliivaga; veerised ja munakad on keskmiselt kulutatud, isomeetrilise, venitatud ja lapliku kujuga; liiv on savikas ja sorteerimata

7,0-8,3m keskmise-teraline liiv kaldkihilise tekstuuriga, kihtide paksusega 0,5-1,5 cm; üksikut peente kruusateradega

8,3-13,0+m kruus keskmise-teralise täiteliivaga; liiv on sorteerimata ja savikas; veerised ja munakad on keskmiselt kulutatud, isomeetrilise, venitatud ja lapliku kujuga



Kasvukiht



Saviliiv



Liivsavi



Liiv



Aleuriit



Viirsavi



Kruus



Moreen



Veerised, munakad

p, k, j

peene-, keskmise-, jämedateraline



Veetase

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Maria Laidla,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
**„Glatsiofluviaalsete pinnavormide morfoloogia ja geoloogia Palivere ja Pandivere
servamoodustiste kompleksis.“**

mille juhendajad on Tiit Hang ja Katrin Kalla,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus , **19.05.2014**